

DW² - Entwicklung einer thermisch verbesserten Schlitzwandkonstruktion

M. Rebhan, R. Marte,
F. Tschuchnigg, J. Schleicher,
G. Vojvodic, H. Kim,
A. Passer, M. Scherz,
T. Potrc Obrecht, G. Winkler,
M. Vremec

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

51/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

DW² - Entwicklung einer thermisch verbesserten Schlitzwandkonstruktion

Dr.techn. Matthias J. Rebhan, Univ. Prof. Roman Marte,
Assoc. Prof. Franz Tschuchnigg, DI Julian Schleicher
Technische Universität Graz, Institut für Bodenmechanik,
Grundbau und Numerische Geotechnik

DI Goran Vojvodic, Dr.techn. Huy Hoang Kim
Technische Universität Graz, Institut für Betonbau

Assoc. Prof. Alexander Passer, DI Marco Scherz,
Dr.techn. Tajda Potrc Obrecht
Technische Universität Graz, Institut für Tragwerksentwurf,
Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen

Assoc. Prof. Gerfried Winkler, DI Matevz Vremec
Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften

Graz, November 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	12
4	Projekthalt	16
	4.1. Entwicklung eines thermisch verbesserten Konstruktionsbetons für Schlitzwandkonstruktionen und andere geotechnische Bauelemente	17
	4.2. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Konstruktionsbetonen.....	18
	4.3. Validierung der Entwicklungen	20
	4.3.1. Numerische Untersuchungen Speicherfunktion	20
	4.3.2. Numerische Untersuchungen Grundwassererwärmung.....	22
	4.3.3. Feldversuche.....	23
	4.4. Untersuchung der Auswirkungen thermischer Speicher auf den Untergrund.....	24
	4.4.1. Anforderungen an Speicherbauwerke und Konstruktionen im Untergrund.....	25
	4.4.2. Nachhaltigkeitsbewertung einer Wärmespeicherkonstruktion	25
5	Ergebnisse	26
	5.1. Neue Betonzusammensetzung	26
	5.1.1. Schaumbeton.....	26
	5.1.2. Porenbeton auf Zementbasis - Gasbeton.....	26
	5.1.3. DW2-Mix – Beton mit Leichtzuschlägen.....	27
	5.2. Ergebnisse der Laborversuche zur Wärmeleitfähigkeit.....	28
	5.3. Ergebnisse numerische Untersuchungen	32
	5.3.1. Einfluss der Modellierung der Heizphase	33
	5.3.2. Einfluss der Schlitzwandbreite.....	33
	5.3.3. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons.....	34
	5.3.4. Einfluss des Wärmespeichers auf den Untergrund	37
	5.4. Ergebnisse Auswirkungsuntersuchungen	39
	5.4.1. Geotechnische Konstruktionselemente	39
	5.4.2. Verwendung von Fertigteilen	40
	5.4.3. Nachhaltigkeitsbewertung.....	40
	5.4.4. Auswirkungen eines Wärmespeichers auf das Grundwasser.....	42
6	Schlussfolgerungen	45
	6.1. Technische Umsetzung	45
	6.2. Rechtliche Umsetzung	46
	6.3. Anforderungen und Problemstellungen	46
7	Ausblick und Empfehlungen	47
	7.1. Wärmespeicherung im Untergrund	47

7.2. Auswirkungen von thermischen Speichern auf den Untergrund	47
7.3. Mögliche Verbesserungen und neue Konstruktionsformen bei Wärmespeichern im Untergrund.....	47
8 Verzeichnisse.....	49

1 Kurzfassung

Forschungsprojekt DW² – Energetisch verbesserte Schlitzwandkonstruktion

Die Speicherung von Energie bzw. die Reduktion des Energieverbrauches von Bauwerken stellt einen großen Bestandteil der Bemühungen zur Schaffung nachhaltiger Siedlungen und Wohnbereiche sowie zur Erreichung der Klimaziele dar. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Verbesserung der thermischen Eigenschaften finden im Regelfall im Hochbau – und den Außenwand- und Deckenkonstruktionen von Wohnbauten statt. Geotechnische Konstruktionselemente wie Schlitz- oder Bohrpfahlwände werden hierbei jedoch oftmals nicht betrachtet, obwohl diese ebenfalls einen Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauches eines Bauwerkes und der Optimierung von Speicherlösungen schaffen könnten.

Im Bereich des Wohnbaues werden Schlitzwand- oder Bohrpfahlkonstruktionen zur Errichtung der Baugrubenumschließung verwendet, und vor allem bei innerstädtischen Baufeldern oftmals als erdberührte Außenwand in den Untergeschossen. Damit kommt diesen Bauteilen – in Bezug auf ihre Nutzung – eine untergeordnete thermische Anforderung zu. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Speichertechnologien – wie beispielsweise Underground Thermal Energy Storages, welche Wärmeenergie im Untergrund speichern und bereitstellen können, benötigen jedoch ebenfalls Umschließungen. Hierfür werden ebenfalls Schlitzwand- oder Bohrpfahlkonstruktionen verwendet, welche neben einer dichtenden und umschließenden Funktion auch thermischen Anforderungen unterliegen. Bei der Verwendung von klassischen Konstruktionsbetonen für derartige Konstruktionselemente kommt es, im Zuge der Speichernutzung, zu einer massiven Erwärmung dieser Bauteile. Neben den damit verbundenen, sich negativ auf die Bilanz des Speichers auswirkenden Energieverlusten, geht mit einer derartigen Erwärmung auch eine Beeinflussung des Untergrundes einher.

Ergänzend zu einer möglichen mechanischen Beeinflussung der Eigenschaften des Untergrundes (Steifigkeit und Festigkeit) ist hierbei vor allem eine möglicherweise stattfindende Erwärmung des Grundwassers maßgebend. Aktuelle normative und gesetzliche Vorschriften geben eine sehr starke Limitation der erlaubten Grundwassererwärmung vor, um die Trinkwasserqualität zu erhalten und in weiterer Folge auch bakterielles Wachstum innerhalb der Grundwasserzonen zu verhindern. Dies bedeutet jedoch auch massive Einschränkungen bei der Errichtung von thermischen Speichern im Untergrund.

Im Zuge des Projektes DW² - Energetisch verbesserte Schlitzwandkonstruktion – wurden daher die Möglichkeiten der Verbesserung und Optimierung der thermischen Eigenschaften von Schlitzwänden und auch anderen geotechnischen Elementen untersucht. Neben der Anwendung und Nutzung neuer – thermisch optimierter – Betonsorten wurden hierzu auch umfassende Labor- und Feldversuchsreihen durchgeführt, um deren Anwendbarkeit und das damit verbundene Potential aufzuzeigen. Ergänzt wurden diese durch numerische Simulationen von Wärmespeichern im Untergrund und den damit verbundenen Einflüssen auf den umliegenden Boden- und Grundwasserkörper.

Die Ergebnisse des Projektes zeigten, dass prinzipiell die Anwendung von thermische verbesserten Konstruktionsbetonen für geotechnische Konstruktionen möglich ist. Hierbei müssen jedoch die Anforderungen an die Herstellung und Einbringung (z.B. Kontraktorverfahren) aber auch die Anforderungen an die Nutzung (z.B. Dichtheit, Druckfestigkeit) entsprechend berücksichtigt werden. Mit den durchgeführten Labor- und Feldversuchen konnte die Eignung eines neu entwickelten Konstruktionsbetons für geotechnische Bauteile im Modellmaßstab gezeigt werden. Ebenfalls konnte durch eine umfassende labortechnische Untersuchung des entwickelten Betons aufgezeigt werden, dass zu Folge einer optimierten Mischung eine Halbierung der Wärmeleitfähigkeit und damit eine Reduktion der energetischen Verluste möglich ist. Zudem konnte durch weitreichende numerische Untersuchungen und Parameterstudien der Einfluss eines derartigen Betons im Vergleich zu einem klassischen Konstruktionsbeton aufgezeigt werden. Hierbei konnte erkannt werden, dass hierdurch eine deutliche Reduktion der Wärmeverluste und der Erwärmung des Untergrundes möglich ist.

Im Zuge des Projektes wurde jedoch auch erkannt, dass trotz eines optimierten Konstruktionsbetons immer noch eine deutliche Erwärmung des Untergrundes und des Grundwassers stattfindet. Aus diesem Grund wurden im Zuge des Projektes ebenfalls Möglichkeiten konzeptioniert, wie dies verhindert bzw. vermindert werden kann. Eine der zukunftsweisenden und nachhaltigsten Lösung dieser Problemstellung ist die Anordnung zusätzlicher Entnahmebrunnen im Außenbereich von thermischen Untergrundspeichern. Damit könnte nicht nur ein Erwärmen des Grundwassers verhindert werden, sondern es würde hieraus auch die Möglichkeit resultieren, bereits erwärmtes Grundwasser (z.B. innerstädtische Hitzeinseln) als Wärmequelle für die Untergrundspeicher zu verwenden und die Verluste des Speichers zu reduzieren. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen, sowohl im Bereich der Simulation als auch der Erprobung erforderlich.

2 Abstract

Research project DW² – Thermally improved diaphragm walls

The storage of energy and the reduction of energy consumption of structures represents a large part of the efforts to create sustainable settlements and housing areas, as well as to achieve the climate goals. Current developments in the field of improving thermal properties usually take place in building construction – mainly the external wall and ceiling structures of residential buildings. Geotechnical construction elements such as diaphragm or bored pile walls, are often not considered, although these can also contribute to reducing the energy consumption of a building and also serve to optimize storage solutions.

In the field of residential building construction, diaphragm walls or bored pile walls are used to enclose the excavation pit and, especially in inner-city construction sites, often as an exterior wall in contact with the ground. Thus, these building components - in relation to their use - have subordinate thermal requirements. However, current developments in the field of thermal storage technologies - such as underground thermal energy storages, which can store and provide thermal energy within the ground - also require enclosures. For this purpose, diaphragm walls or bored pile walls are used, which are subjected to thermal requirements in addition to a sealing and enclosing function. The use of conventional structural concrete for such structural elements results in massive heating of these components in the course of storage utilization. In addition to the associated energy losses, which have a negative impact on the balance of the thermal energy storage, also heating of the subsoil takes place.

In addition to a mechanical influence on the properties of the subsoil (stiffness and strength), a possible heating of the groundwater is of particular importance. Current normative and legal regulations specify a very strong limitation of the permitted groundwater heating in order to maintain the drinking water quality and subsequently to prevent bacterial growth within the groundwater zones. However, this also means massive restrictions on the construction of underground thermal storage facilities.

In the course of the DW² project – Thermally improved diaphragm walls - the possibilities of improving and optimizing the thermal properties of diaphragm walls and other geotechnical elements were investigated. In addition to the application and use of new - thermally optimized - concrete types, comprehensive laboratory and field test series were carried out to demonstrate their applicability and the associated potential. These were supplemented by numerical simulations of thermal energy storages in the subsurface and the associated influences on the surrounding soil and groundwater.

The results of the project showed that in principle the application of thermally enhanced structural concretes for geotechnical structures is possible. However, the requirements for production and placement (e.g. contractor method) but also the requirements for use (e.g. impermeability, compressive strength) have to be considered accordingly. With the laboratory and field tests carried out, it was possible to demonstrate the suitability of a newly developed structural concrete for geotechnical components on a model scale. Likewise, a comprehensive laboratory investigation of the developed concrete showed that, as a result of an optimized mixture, a halving of the thermal conductivity and thus a reduction of the energetic losses is possible. In addition, extensive numerical investigations and parameter studies were able to demonstrate the influence of such a concrete in

comparison to a classic structural concrete. It could be recognized that a significant reduction of heat losses and heating of the subsoil is possible.

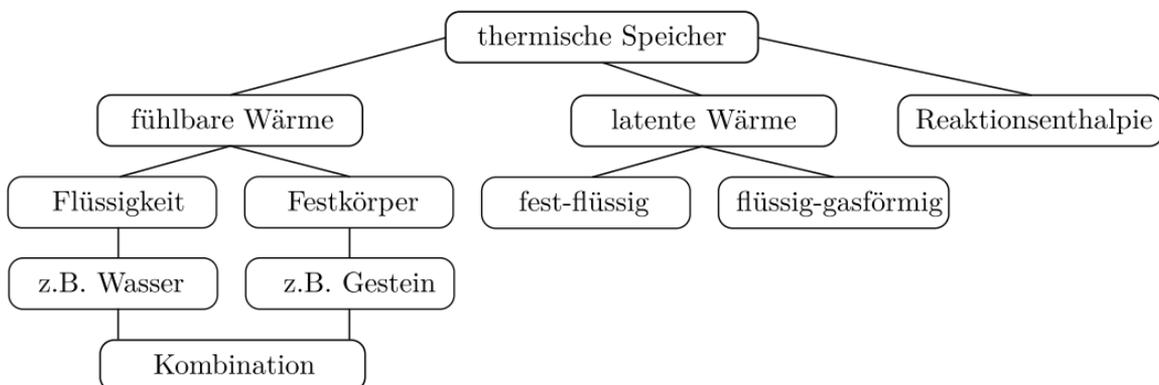
In the course of the project, however, it was also recognized that despite an optimized structural concrete, there is still a significant heating of the subsoil and the groundwater. For this reason, possibilities for preventing or reducing this were also conceptualized during the project. One of the most future-oriented and sustainable solutions is the arrangement of additional extraction wells in the outer area of thermal underground storage. This would not only prevent the groundwater from heating up, but would also result in the possibility of using already heated groundwater (e.g. inner-city heat islands) as a heat source for the underground storage and reduce the losses of the storage. For this, however, further investigations are required, both in the field of simulation and in field and lab tests.

3 Ausgangslage

Zufolge des Klimawandels und der Forderung einer ökologischen und nachhaltigen Energieversorgung ist die Bereitstellung von Wärme eine der großen Fragestellungen im urbanen Raum. Im Zuge des Projektes DW² wird eine Methode zur Herstellung und Errichtung einer thermisch verbesserten Schlitzwandkonstruktion bzw. anderen geotechnischen Elementen untersucht. Damit sollen zukünftig energietechnische Verbesserungen bei Bauwerken sowohl im Neubau als auch im Bestand erzielt werden können. Für die Errichtung von Bauwerken – sowohl im Hoch-, als auch im Industriebau – kommt oftmals Beton zum Einsatz. Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass nachhaltigere und alternative Baustoffe wie beispielsweise Leichtkonstruktionen und Holz hier vermehrt Einzug halten. Die Anwendung derartiger Baustoffe ist im Hochbau mit gewissen Einschränkungen möglich, und bereits in vielen Projekten umgesetzt worden. Die stetig steigende Urbanisierung des menschlichen Lebensraums in Kombination mit dem Bevölkerungswachstum auf unserem Planeten verursachen einen signifikanten Anstieg des globalen Energieverbrauches (Borri *et al.*, 2021).

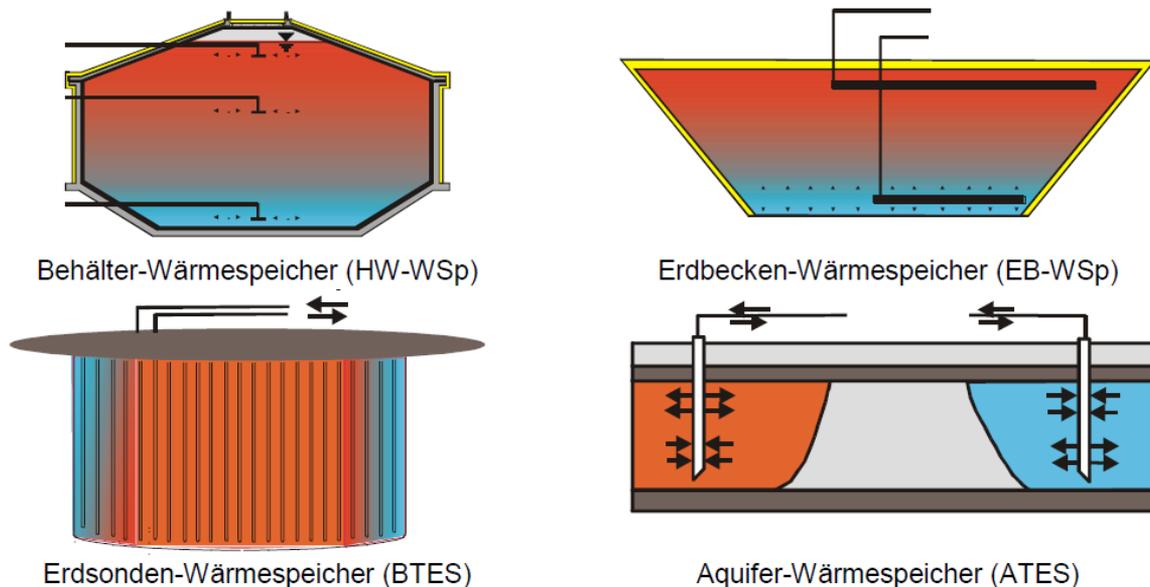
Um dem steigenden Energiebedarf entgegenzusteuern und den Einsatz von erneuerbaren Energieformen zu fördern, bietet sich die Integration von sogenannten Thermal Energy Storage (TES) Systemen an. Erneuerbare Energiequellen, welche eine fluktuierende Leistungsabgabe (z.B. Solar- und Windenergie) aufweisen, können durch Integration eines TES Systems zu einer stabilen Energiequelle umgewandelt werden. Nicht benötigte Energie kann im TES System gespeichert werden, um diese zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen (Bott *et al.*, 2019). Geothermische Speicherlösungen (z.B. Erdbecken-Wärmespeicher bzw. UTES Systeme) können einen Beitrag zu dieser Energiewende leisten. Thermische Speicher können hierzu anhand der Art des Speichermediums charakterisiert werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird zwischen sensiblen (fühlbaren), latenten und thermochemischen (Reaktionsenthalpie) Speichermedien unterschieden. Weitere Merkmale zur Unterscheidung von thermischen Speichern sind zum Beispiel das Temperaturniveau, die Speicherdauer sowie die Position im Energiesystem. Spricht man von der Speicherdauer kann zwischen Kurzzeit-, Langzeit- und Saisonal speichern differenziert werden (Falkner, 2014).

Abbildung 1: Einteilung thermischer Speicher nach dem Speichermedium (Falkner, 2014)



Laut Ochs (2013) können TES Systeme in Behälter-Wärmespeicher, Erdbecken-Wärmespeicher, Erdsonden-Wärmespeicher (BTES) und Aquifer-Wärmespeicher (ATES) unterteilt werden (siehe Abbildung 2). Eine weitere Konstruktionsart bildet der Kavernenspeicher (CTES) (Ochs, 2013). Dieser wird im Folgenden, auf Grund seiner Anwendung im Festgestein, nicht näher behandelt.

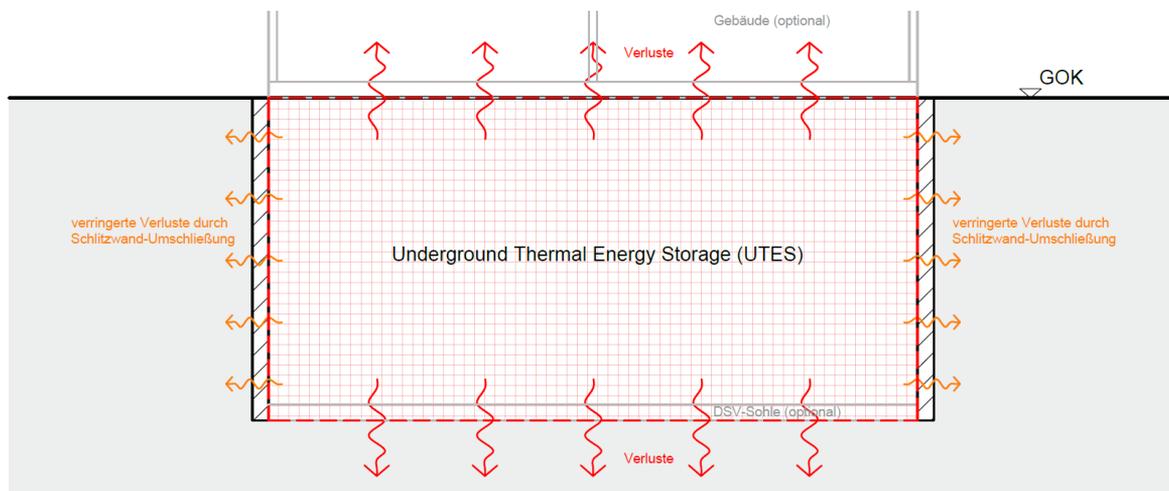
Abbildung 2: Arten von Wärmespeichern (Ochs, 2013)



Weiters unterscheidet man zwischen oberirdischen, teilvergrabenen und unterirdischen Speichersystemen. Der Wandaufbau eines Speichers muss wasser- und wasserdampfdicht sein. Um die Energieverluste durch die Wände zu minimieren, werden diese, vor allem bei oberirdischen Speichern, meist gedämmt ausgeführt. Da der Speicher im oberen Bereich die höchsten Temperaturen aufweist, empfiehlt es sich die Dicke der Dämmung nach oben hin zu erhöhen. Aus wirtschaftlichen Gründen werden unterirdische Speicher meist nicht gedämmt, obwohl dies konstruktiv möglich wäre (Ochs, 2013). Ein effizienter Speicher lässt sich durch eine den Randbedingungen gut angepasste Geometrie erzielen. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen (A/V) möglichst gering ist, um Verluste durch Wärmeleitung über die Speicherwände zu minimieren. Oftmals wird auch das Verhältnis von Durchmesser zu Höhe des Speichers (h/d) als Beurteilungsgrundlage der Geometrie herangezogen (Bott *et al.*, 2019). Für Langzeit- bzw. Puffer-Wärmespeicher erwies sich ein h/d -Wert von 3,0 als praktikabel während saisonale Speicher idealerweise einen Wert von 1,0 erfordern (Ochs, 2013).

Unter einem UTES System versteht man eine Speicherlösung, welche den vorhandenen Untergrund als Speichermedium nutzt (Sarbu und Sebarchievici, 2018). Das in Abbildung 3 dargestellte Konzept eines thermisch verbesserten UTES Systems bildet die Grundlage der folgenden Studien und Untersuchungen dieses Forschungsprojektes. Mittels einer aus Schlitzwänden (oder auch anderen geotechnischen Konstruktionselementen) bestehenden Umschließung des Speicherinhaltes sollen die Energieverluste durch die vertikalen Grenzen des Speichers verringert werden. Maßgebend für die Verringerung der Temperaturverluste des Speichers sind hierbei die thermischen Eigenschaften des verwendeten Konstruktionsbetons.

Abbildung 3: Schema eines thermisch verbesserten UTES Systems



Folgende Randbedingungen müssen bei der Planung bzw. Errichtung eines thermisch verbesserten UTES Systems berücksichtigt werden:

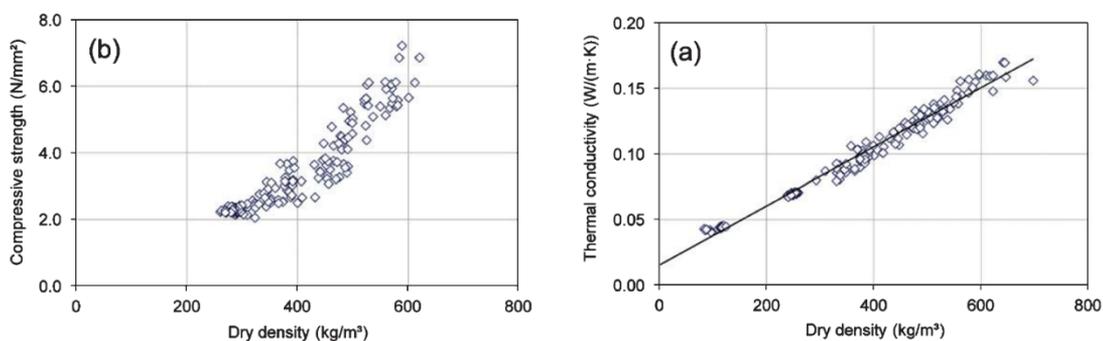
- Bei der Errichtung eines UTES Systems im Zuge eines Neubauprojektes kann die Speicherumschließung zusätzliche Funktionen erfüllen. Aufgrund der hohen ausführbaren Tiefen von Schlitzwandkonstruktionen können diese als Außenwände für Tiefgaragenbauten oder Kellergeschosse genutzt werden. Wobei der Untergrund unterhalb des untersten Geschosses des Bauwerks als UTES dienen kann.
- Vor allem im urbanen Raum ist es nur limitiert möglich UTES unter Freiflächen oder Neubauten zu errichten. Um „verlorenen“ Boden unter Bestandsgebäuden zu nutzen und zusätzliche zentral verfügbare erneuerbare Energie bereitzustellen, empfiehlt sich die Anordnung von UTES Systemen unter Bestandsbauten.
- Im Gegensatz zu anderen TES Systemen nutzen UTES Systeme den vorhandenen Untergrund als Speichermedium. Wie bereits erwähnt, kann dadurch ungenutztes Bodenvolumen als Energiespeicher herangezogen werden. Das Speichermedium ist somit bereits vorhanden und muss nicht kostenintensiv bereitgestellt werden. Weiters ist die Errichtung eines UTES nicht von der Verfügbarkeit von Freiflächen abhängig. Darüber hinaus muss keine oberirdische Speicherkonstruktion errichtet und kein (bzw. nur ein minimaler) Aushub getätigt werden, um den Speicher zu errichten.
- Bei der Errichtung eines UTES Systems – BTES oder ATES – muss darauf geachtet werden, dass sich die hydrologischen Verhältnisse im Untergrund für ein solches System eignen. Um erhebliche Energieverluste durch Konvektion zu vermeiden, sollte kaum bis keine Grundwasserströmung vorhanden sein. Außerdem muss auf die wasserrechtlichen Gegebenheiten vor Ort geachtet werden. Weiters sind die Platzverhältnisse zu beachten. Zum Bohren von Erdwärmesonden (BTES) bzw. Brunnen (ATES) muss ausreichend Platz für das notwendige Arbeitsgerät vorhanden sein.

Die obenstehenden Punkte bilden eine erste Abschätzung von möglichen Vor- und Nachteilen bzgl. der Errichtung von UTES Systemen. Im Weiteren empfiehlt es sich eine umfassendere Zusammenstellung zu erarbeiten.

Aufgrund der hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität des Wassers empfiehlt es sich ein UTES System möglichst in Bereichen des Untergrundes zu errichten, in denen vorhandenes Grundwasser als Speichermedium genutzt werden kann. Mit der thermischen Veränderung des Bodens wird folglich allerdings auch die Temperatur des Grundwassers verändert. Die Nutzung des Untergrundes und des Grundwassers wird dabei durch das ÖWAV-Regelblatt 207 (2009) definiert. In diesem werden Randbedingungen bzgl. Erwärmung und Kühlung des Untergrundes bzw. Grundwassers definiert. Grundsätzlich wird diesbezüglich zwischen den unterschiedlichen Arten der thermischen Nutzung des Untergrundes bzw. Grundwassers differenziert. Zum Beispiel gelten andere Bestimmungen im Fall einer Entnahme / Einleitung thermisch genutzten Grundwassers als bei der Verwendung von Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren. Wird genutztes Grundwasser in den Untergrund eingeleitet, darf die Temperatur des Untergrundes am Punkt der Einleitung einen Schwellenwert von 5°C bzw. 20°C nicht unter- bzw. überschreiten. Weiters darf sich das genutzte Grundwasser am Einleitungspunkt um maximal 6 K erwärmen bzw. abkühlen. Kommen Erdwärmesonden zum Einsatz ist die thermische Nutzung des Untergrundes durch die Temperatur des Wärmeträgermediums reglementiert. Diese darf nicht unter - 1,5°C bzw. über 30°C betragen (ÖWAV-Regelblatt 207, 2009).

Die bisher behandelte Art eines UTES Systems, welche sich den bestehenden Untergrund und das darin enthaltene Grundwasser zu Nutze macht, sieht in der Regel keine Entnahme bzw. Einleitung thermisch genutzten Grundwassers vor. Man kann davon ausgehen, dass die Entnahme bzw. Einleitung von Energie im Regelfall durch Erdwärmesonden oder Erdwärmekollektoren stattfindet. In jedem Fall wird es bei Verwendung eines Aufbaues, wie in Abbildung 3 dargestellt, zu einer Erwärmung des Untergrundes und des Grundwassers außerhalb des Speichers kommen. Derartige Effekte können jedoch reduziert werden, indem beispielsweise Entnahmebrunnen installiert werden, oder indem eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe (Beton) vorgenommen wird. Hierbei ist die Verringerung der Trockendichte, wie dies anhand des Beispiels eines Porenbetons in Abbildung 4 zu erkennen ist, entscheidend für die Verbesserung der thermischen Leistung von Beton.

Abbildung 4: Korrelation zwischen der Trockendichte von Porenbeton und der Wärmeleitfähigkeit (rechts) und der Druckfestigkeit (links) (Miccolia et al., 2015)



Mit dieser Verringerung der Trockendichte und der Bildung von großen Makroporen geht jedoch ein erheblicher Festigkeitsverlust (Narayanan & Ramamurthy, 2000) (ACI-213R, 2014) einher. Zudem ist die Verwendung derartiger Konstruktionsbetone unter geotechnischen Randbedingungen entsprechend schwierig und herausfordernd. In Kombination mit den weiter oben angeführten Anforderungen an die Erwärmung des Grundwassers ist hier eine entsprechende Lösung erforderlich, um die Errichtung solcher Speicherlösungen zu ermöglichen.

4 Projektinhalt

Ziel des Projektes war es, die thermischen Eigenschaften und damit das Potential von Thermal Energy Storages (TES) und vor allem Underground Thermal Energy Storages (UTES) zu verbessern. Hierzu wurden eine Reihe von Einzelzielen in einer interdisziplinären Zusammenarbeit adressiert. Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

Untersuchung der thermischen Verbesserung eines Konstruktionsbetons für geotechnische Zwecke

Aktuelle Betone, welche für die Errichtung von der Umschließung von Untergrundspeichern verwendet werden können bieten nur bedingt thermisch ausreichende Eigenschaften, um einen Verlust der gespeicherten Wärme zu verhindern und damit in weiterer Folge eine effektive Speicherung der Wärme zu ermöglichen. Dies ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass die verwendeten Betone nicht dezidiert für den Einsatz bei Wärmespeichern entwickelt wurden. Zudem ist die Verwendung bereits thermisch verbesserter Betone, wie dies beispielsweise im Hochbau möglich ist, auf Grund der Anforderungen aus der Herstellung bei geotechnischen Konstruktionen nur bedingt sinnvoll.

Bestimmung der Eigenschaften von Materialien und Baustoffen

Basierend auf der Verbesserung des Konstruktionsbetons wurde zudem eine Bestimmung der Eigenschaften dieses Prozesses vorgenommen. Neben den konstruktiven Eigenschaften wie der Druckfestigkeit und das Ausbreitmaß wurde zudem eine Erhebung der thermischen Eigenschaften vorgenommen. Der Fokus hierbei lag neben der Erhebung der Bestimmungsmöglichkeiten auch in der Bandbreite dieser und den Auswirkungen geotechnischer Effekte wie beispielsweise der Wasserlagerung der Proben.

Validierung des Verbesserungspotentials

Gemeinsam mit der Bestimmung der thermischen Eigenschaften des entwickelten Betons wurde zudem eine praktische Betrachtung der Entwicklung vorgenommen. Neben Laborversuchen, welche die Streuung der Kennwerte fokussierten, wurde zudem in Feldversuchen die Herstellbarkeit und Anwendbarkeit der Entwicklungen unter geotechnischen Anforderungen untersucht.

Untersuchung der Auswirkungen von thermischen Speichern auf den Untergrund

Basierend auf den Entwicklungen und sich den daraus ergebenden Randbedingungen und Kennwerte wurden eine Reihe von numerischen Studien durchgeführt, welche die Auswirkungen von thermischen Speichern auf den Untergrund betrachteten. Zum einen wurde hierbei eine rein geotechnische Betrachtung des Untergrundes und dessen Aufwärmung vorgenommen, um die Auswirkungen eines verbesserten Konstruktionsbetons für die Umschließung zu erfassen. Zum anderen wurden zudem Studien zur Strömung des Grundwassers zu den sich daraus ergebenden Effekten auf den Untergrund aber auch die Wärmeverluste sowie die sich ergebenden Einschränkungen vorgenommen.

Abschließend wurde eine Zusammenführung der Ergebnisse vorgenommen, um das Verbesserungspotential der erarbeiteten Möglichkeiten aufzuzeigen und zudem die Grundlage für weitere Schritte und Verbesserungen zu schaffen. Hierbei wurde zum einen die thermische Verbesserung des Konstruktionsbetons betrachtet, zum anderen wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Simulation derartiger Speicherlösungen verwendet, um neue Konzepte und Konstruktionsformen anzudenken.

Nachfolgend werden die oben angeführten Punkte in einzelnen Teilschritten beschrieben. Diese dienen als Grundlage für die in Kapitel 5 und 6 dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Zudem wird hier die Basis für den in Kapitel 7 angeführten Ausblick und die Empfehlungen zur Verbesserung des Potentials der thermischen Nutzung des Untergrundes gelegt.

4.1. Entwicklung eines thermisch verbesserten Konstruktionsbetons für Schlitzwandkonstruktionen und andere geotechnische Bauelemente

Wie bereits angeführt, wurde im Zuge des Projektes die Entwicklung und Optimierung von unterschiedlichen Betonmischungen vorgenommen. Hierbei konnte eine Mischung identifiziert werden, welche sich für die Anwendung bei Schlitzwänden und anderen geotechnischen Konstruktionen eignet. Diese muss hierzu folgende Anforderungen erfüllen:

- Der Beton muss selbstverdichtende Eigenschaften aufweisen;
- Der Beton muss einen hohen Entmischungswiderstand haben;
- Der Beton muss eine gute Kohäsion und einen hohen Auswaschungswiderstand aufweisen.

Zusätzlich muss die Dichte des Betons so gering wie möglich sein, um eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit zu erreichen. Bei Porenbeton auf Zementbasis kann ein Zementleim mit einer Dichte von 2.000-2.200 kg/m³ vor dem Ausdehnungsprozess des Betons problemlos in der Schlitzwand appliziert werden. Die Auftriebskraft auf die feinen Partikel des Kleisters ist nicht groß. Daher ist eine Trockenbetondichte von 400-600 kg/m³ das Ziel der Bauteilgestaltung. Bei Leichtbeton ist die Auftriebskraft auf poröse leichte Gesteinskörnungen derart stark, was zu einem Entmischen mit einem daraus folgenden Aufschwimmen einer großen Menge von Gesteinskörnung führen kann. Daher ist bei der Mischungsplanung eine erwartete Trockenbetondichte von 1.200-1.400 kg/m³ für den Betoneinbau unter Verwendung des Kontraktorverfahrens anzustreben.

Für tragende Schlitzwände, welche durch eine Stützwirkung des Erdkörpers oder Strömungskräfte zufolge eines Wasserspiegelunterschiedes beaufschlagt werden, ist zudem eine charakteristische Druckfestigkeit von Leichtbeton nicht geringer als LC12 gemäß (CEN-EC2_1_1, 2009) anzustreben. Der Beton muss eine hohe Frühfestigkeit aufweisen, um bereits in einem sehr frühen Alter ein stabiles Gefüge zu erhalten, welches ein Eindringen von Grundwasser, und eine damit einhergehende Zermischung bzw. negative Beeinflussung, verhindert. Im dauerhaft feuchten Zustand müssen die Betonbestandteile aus hochvolumigen reaktiven Zusätzen bestehen, um die Dauerhaftigkeit des Betons durch die Bildung von dicht stabilen, dauerhaften Puzzolanprodukten zu verbessern.

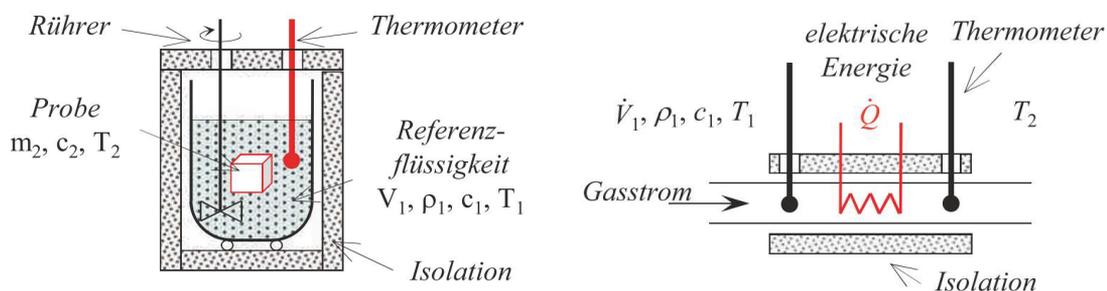
Die Ergebnisse der Entwicklung einer neuen Betonrezeptur sind in Kapitel 5.1 angeführt.

4.2. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Konstruktionsbetonen

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Definition und der Bestimmung von thermischen Materialeigenschaften, wobei das Hauptaugenmerk auf der Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] und der spezifischen Wärmekapazität c [J/kgK] liegt. Zuerst werden die signifikanten physikalischen Größen und deren Herleitung beschrieben. Anschließend wird auf die Möglichkeiten zur Bestimmung jener näher eingegangen. Dies wird als Grundlage ausgearbeitet, um die Bestimmung der thermischen Eigenschaften des in Kapitel 4.1 beschriebenen Konstruktionsbetons vornehmen zu können und um diese Kennwerte in den weiteren Ausarbeitungen des Projektes verwenden zu können. Für das beschriebene Konzept eines UTES Systems, wie in Abbildung 3 dargestellt, sind sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Wärmekapazität des Konstruktionsbetons und des Untergrundes von signifikanter Bedeutung. Nachstehend werden diese relevanten physikalischen Größen entsprechend der (ÖNORM EN ISO 7345, 2018), welche sich mit dem Wärmeverhalten von Baustoffen und Gebäuden beschäftigt, hergeleitet bzw. die darin befindlichen Grundlagen aufgezeigt.

Bei der Herleitung der Wärmeleitfähigkeit muss beachtet werden, dass sich der Stoff, welcher geprüft werden soll aus einem homogenen, isotropen Festkörper zusammensetzt, welcher die Fläche A und die Dicke d besitzt. Der Körper besitzt zwei parallele, isotherme Seitenflächen, welche die Temperaturen T_1 und T_2 aufweisen. Alle weiteren Begrenzungsflächen des Körpers werden adiabat angenommen (ÖNORM EN ISO 7345, 2018). Ist eine Fläche adiabat, so kann über diese kein Energieaustausch stattfinden – sie gilt als wärmedicht. Über jene Grenze kann das System also keine Energie verlieren oder aufnehmen (Baehr und Kabelac, 2006). Weiters werden stationäre Bedingungen und eine temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit des Materials angenommen. Es gilt das Fourier'sche Gesetz (ÖNORM EN ISO 7345, 2018). Um die thermischen Eigenschaften eines Materials feststellen zu können, kommen verschiedenste Prüfverfahren zum Einsatz. Diese werden im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. So wird beispielsweise die Wärmekapazität im sogenannten Mischungskalorimeter (Feststoffe, Flüssigkeiten vgl. Abbildung 5 links) oder im Durchflusskalorimeter (Gase vgl. Abbildung 5 rechts) bestimmt (Hannoschöck, 2018).

Abbildung 5: Einrichtung zur Messung der Wärmekapazität, Mischungskalorimeter (links), Durchflusskalorimeter (rechts), (Hannoschöck, 2018)



Derartige Geräte sind jedoch nicht für die Anwendung auf Beton, Bodenproben oder andere Festkörper in pulverähnlicher Form geeignet. Hierzu kommen Plattengeräte (nach ISO 8302, 1991), Wärmestrommessplatten (nach ISO 8302, 1991) oder Heizkästen (geregelt oder kalibriert nach ÖNORM EN ISO 8990, 1996) zur Anwendung.

Im Zuge des Projektes kam eine Oberflächen-Sonde – auch als HLQ-Sonde bezeichnet und in Abbildung 6 links dargestellt, zum Einsatz. Diese wird, wie in Abbildung 6 rechts dargestellt, in einem Kühlschrank installiert, um keine bis geringe Temperaturschwankungen aufzuzeigen. Die Sonde wird wie in Abbildung 6 rechts zu sehen auf der Probe aufgelegt. Um eine ausreichend gute Leitfähigkeit zwischen Sensor und Material zu gewährleisten, kann, vor Auflegen der Sonde, eine Wärmeleitpaste aufgebracht werden. Diese verbessert den Kontakt und gleicht etwaige (kleine) Unebenheiten der Probenoberfläche aus. Optional kann die Probe in einer Presse eingespant werden.

Abbildung 6: HLQ-Sonde im Zuge der Versuche, Sonde auf einem Kalibrierstück (links), Versuchsaufbau in einem Kühlschrank (rechts)



Der entwickelte Leichtbeton (DW2-Mix) weist einen signifikanten Anteil an Blähtonzuschlägen auf. Um einen potenziellen Einfluss des Durchmessers der Zuschläge zu untersuchen, wurden sowohl Proben mit Blähtonzuschlägen L8/16 als auch L4/8 (siehe Abbildung 7 links und rechts) hergestellt. Bis zur Versuchsdurchführung wurden die Proben Unterwasser gelagert. Aufgrund dessen wurden die Proben zuerst im nassen Zustand untersucht. Die Proben wurden anschließend oberflächlich abgetupft, um überschüssiges Wasser zu entfernen. Danach konnte die Probe zur Dichtebestimmung gewogen und gemessen werden. Im Anschluss daran wurde die Probe eingebaut. Aufgrund der hohen Feuchtigkeit im Material wurde die Probe inkl. Sonde, mit einer Folie umwickelt. Dies gewährleistet einen möglichst geringen Wasserverlust während der Durchführung der Prüfung.

Nachdem alle Versuche mit nassen Proben abgeschlossen waren, wurden die Betonwürfel bei 60°C im Ofen bis zur Massenkonstanz getrocknet. Laut ÖNORM EN ISO 17892 (2015) ist die Massenkonstanz folgendermaßen definiert: Die Probe weist eine Massenveränderung von maximal 0,1% pro Stunde auf. Im Anschluss wurden die getrockneten Proben gewogen und nochmals geprüft, um den Unterschied zwischen nassem und trockenem Beton zu eruieren.

Abbildung 7: Blähonzuschlag L8/16 (links) & L4/8 (rechts)



Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in Kapitel 5.1.3 angeführt.

4.3. Validierung der Entwicklungen

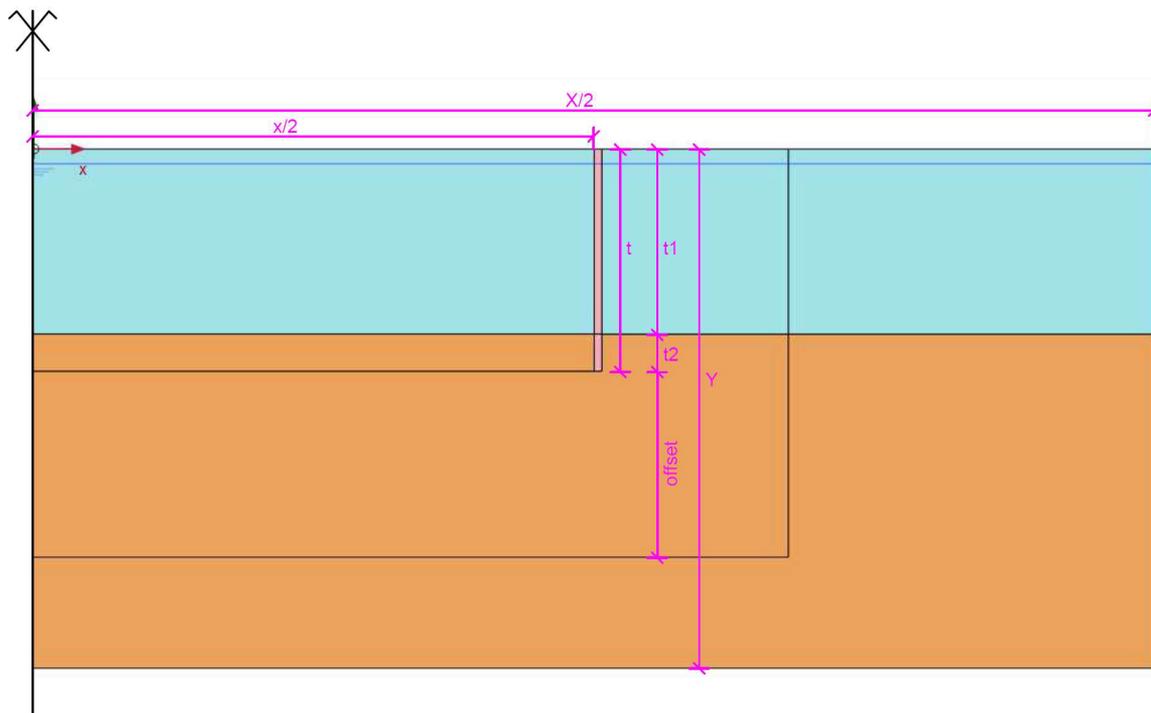
Um die Ergebnisse aus der Entwicklung des thermisch verbesserten Konstruktionsbetons zu untersuchen, wurden eine Reihe von numerischen Studien durchgeführt. Diese beziehen sich zum einen auf die Untersuchungen einer Speicherfunktion mit einer thermisch verbesserten Schlitzwandkonstruktion (Kapitel 4.3.1) und auf die Ausbreitung der Wärme im Untergrund (Kapitel 4.3.2). Zudem wurden Feldversuche, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, durchgeführt, um die Anwendbarkeit des Betons unter praktischen Bedingungen zu betrachten.

4.3.1. Numerische Untersuchungen Speicherfunktion

Um den Einfluss eines thermisch verbesserten Konstruktionsbetons auf ein Underground Thermal Energy Storage (UTES) System zu untersuchen, wurden neben angeführten Laborversuchen numerische Analysen mittels PLAXIS 2D (Bentley Systems, 2020) durchgeführt.

PLAXIS 2D ist eine zweidimensionale Finite Elemente Software zur Analyse verschiedenster geotechnischer Problemstellungen. Diese ermöglicht sowohl die Durchführung einer Stabilitätsanalyse als auch die Berechnung von Verformungen und bietet die Möglichkeit, die Grundwasserströmung und den Wärmefluss innerhalb eines Systems zu untersuchen (Bentley Systems, 2020). Um ein UTES System abzubilden, wurde ein plane strain Modell, wie in Abbildung 8 ersichtlich, erstellt. Der simulierte Speicher hat eine Breite von 150 m (=x) und eine Tiefe von 30 m (=t). Das gesamte Modell ist 300 m (=X) breit und 70 m (=Y) tief. Der Grundwasserspiegel wurde in einer Tiefe von 2 m angenommen. Die blau dargestellte Bodenschicht stellt eine durchlässige Kies/Sand-Schicht dar. Die darunterliegende (in braun dargestellte) Schicht repräsentiert einen tonig, schluffigen Untergrund. Die Schichtgrenze liegt in einer Tiefe von 25 m (=t1). Die beiden Schlitzwände (rot), links und rechts des Speichers, reichen 30 m (=t) tief in den Untergrund und binden dementsprechend 5 m (=t2) tief in den weniger durchlässigen tonig, schluffigen Untergrund ein. Damit wurde versucht, die Grundwasserströmung im System zu minimieren bzw. den Einfluss des Grundwassers auf die späteren Berechnungen zu exkludieren. Die Breite der beiden Schlitzwände wurde mit 100 cm angenommen.

Abbildung 8: Darstellung des verwendeten PLAXIS Modells zur numerischen Simulation



Zum Zweck der nachfolgenden Untersuchung wurde das dargestellte symmetrische Modell unter der Annahme einer konstanten Speichertemperatur von 90°C und einer Betrachtungsdauer von 150 Tagen berechnet. Boden lässt sich im Allgemeinen als Dreiphasensystem darstellen und setzt sich aus Feststoff (Bodenkörner), Flüssigkeit (Porenwasser) und Porengas (Luft) zusammen (Boley, 2019). Jede der drei Stoffkomponenten weist spezifische thermische Eigenschaften, respektive Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmespeicherkapazität c auf, welche in der Berechnung mit PLAXIS 2D berücksichtigt werden müssen (Bentley Systems, 2020). Im Zuge des Projektes wurden eine Reihe an Parametervariationen vorgenommen. Diese umfassten:

- Bodenparameter:
Um die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenparameter – und die daraus folgende Schwankung bei der Funktion eines Wärmespeichers zu erfassen – wurden eine Reihe von Bodenparametern variiert. Da es sich in diesem Projekt um eine Speicherkonstruktion handelt wurden hier, nicht wie sonst bei geotechnischen Betrachtungen üblich Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte, sondern thermische Eigenschaften untersucht. Diese waren die Wärmeleitfähigkeit λ_s [W/mK], die spezifische Wärmespeicherkapazität c_s [J/kgK], der Einfluss des Grundwasserspiegels und die initiale Porenzahl e_{init} .
- Klima:
Da der Deckel des Speichers im vorliegenden Modell (siehe Abbildung 8) mit der Umgebung in Kontakt steht, muss dieser Bereich berücksichtigt werden. Demzufolge wurde dies durch eine definierte Klimalage an der Oberfläche berücksichtigt. Hierzu wurde eine Klimakurve im Modell implementiert.
- Heizphasen:
Um die Erwärmung des Speichers zu betrachten, wurden unterschiedliche Methoden untersucht. Hierzu kam eine plötzliche Erwärmung des Speichers (sudden heating), eine lineare bzw. flächige Wärmequelle bei welcher der Speicher in einem Zeitraum von 93 Tagen von 10 auf 90°C geheizt wurde.

- **Betonsorten:**
Um die Auswirkungen eines thermisch verbesserten Betons für die Schlitzwandumschließung zu erfassen, wurde neben unterschiedlichen thermischen Eigenschaften, basierend auf den durchgeführten Laborversuchen, auch eine Variation der Stärke (Dicke) der Konstruktion vorgenommen.

Diese Studien wurden durchgeführt, um zum einen die Auswirkungen einer Speicherkonstruktion auf den Untergrund zu erfassen und zum anderen, basierend auf einem einheitlichen Modell, eine Darstellung des Potentials und der Funktion eines thermisch verbesserten Betons zu validieren. Zudem diente dieses Modell dazu, die Möglichkeiten und Randbedingungen einer thermischen Simulation einer Wärmespeicherkonstruktion im Untergrund aufzuzeigen.

Weitere Angaben zum Modell sowie eine vertiefte Ausarbeitung der Ergebnisse sind in der Masterarbeit von Schleicher Julian (2022) zu finden. Eine kurze Aufbereitung der Ergebnisse findet sich in Kapitel 5.3.

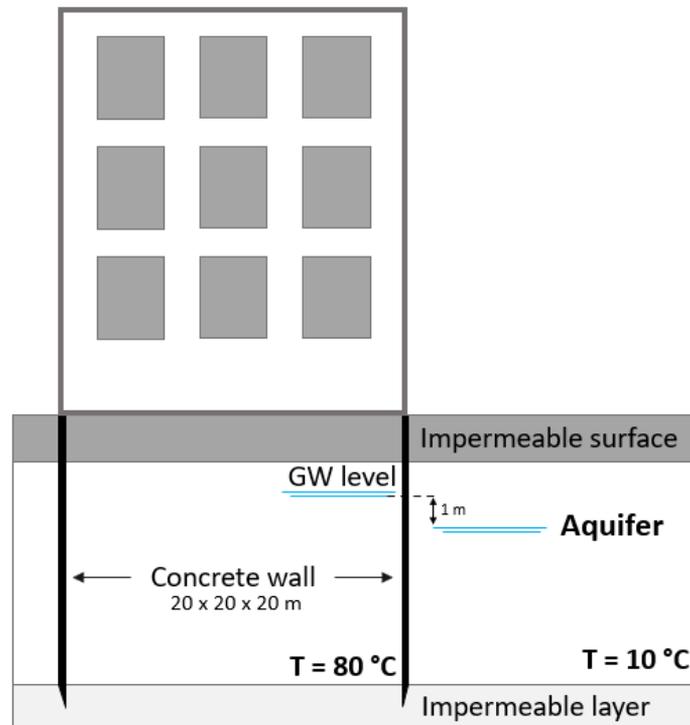
4.3.2. Numerische Untersuchungen Grundwassererwärmung

Neben den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen numerischen Untersuchungen wurden die Auswirkungen eines kleinen (20x20x20 m) UTES, wie in Abbildung 9 dargestellt, auf einen seichtliegenden Aquifer aus alluvialen Sedimenten untersucht. Dabei wurden verschiedene Einflussfaktoren wie die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Betonarten und Parameter der Grundwasserströmung berücksichtigt und variiert. Ziel war die Quantifizierung der raumzeitlichen Ausbreitung der Wärmefahne im Grundwasser abstromig eines UTES unter der Annahme verschiedener hydrogeologischer Rahmenbedingungen.

Die Modellierung der Wärmeausbreitung im Untergrund basiert auf mathematischen und physikalischen Zusammenhängen, welche die relevanten Wasserströmungs- und Wärmetransportprozesse in porösen Medien beschreiben. Diese Prozesse umfassen hauptsächlich Wärmeleitung, Wärmeadvektion im strömenden Wasser, thermische Dispersion und Wärmeaustausch mit der festen Matrix (Stauffer et al., 2019). Nach Hecht-Méndez et al. (2010), Anderson (2005) und Thorne (Thorne et al., 2006) können Fragestellungen der Wärmeausbreitung aufgrund der Analogie von Stoff- und Wärmetransportprozessen mit Hilfe von Stofftransportprogrammen behandelt werden, die die dreidimensionale Wärmetransportgleichung lösen können.

Der Wärmeaustausch zwischen dem geschlossenen UTES-System und dem umgebenden Grundwasser sowie die Ausbreitung der Wärmefahne im Grundwasser wurden mit dem Computerprogramm SEAWAT modelliert (Langevin et al., 2008). Das Programm SEAWAT ist eine gekoppelte Version von MODFLOW und MT3DMS, die zur Simulation von Strömungen mit variabler Dichte und Wärmetransport im Untergrund verwendet wird. Das Programm wurde für mehrere Wärmeübertragungsprobleme getestet und eignet sich für numerische Simulationen, bei denen Temperaturänderungen die Grundwasserströmung beeinflussen (Thorne et al., 2006).

Abbildung 9: Konzeptionelles Modell eines UTES-Speichers



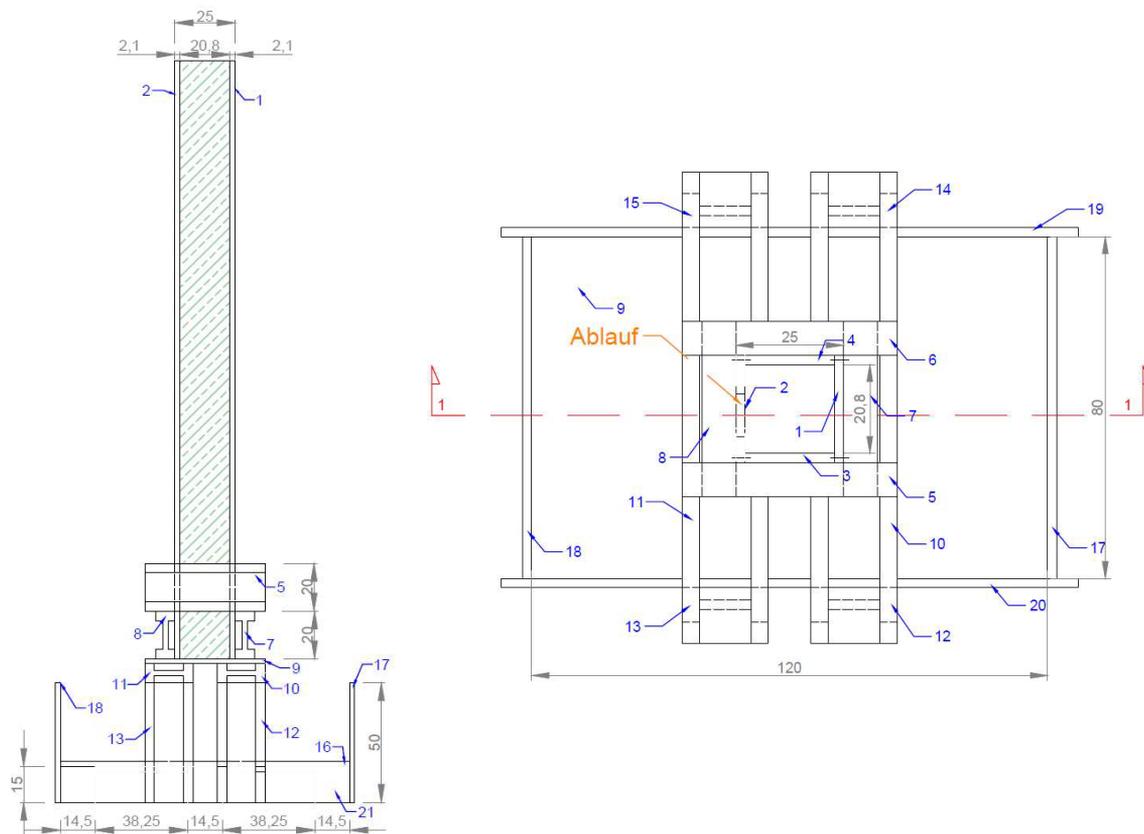
Identisch wie in den numerischen Untersuchungen zum Verhalten eines Wärmespeichers wurden auch bei diesen Betrachtungen Parameterstudien durchgeführt. Diese umfassten den Einfluss der Temperatur des Speicherinhaltes, die Zeitdauer der Speichernutzung, sowie unterschiedliche Materialien für die Umschließungskonstruktion des Speichers. Neben einer zweidimensionalen Betrachtung wurden diese Untersuchungen auch an einem dreidimensionalen Modell vorgenommen, um die gesamte geometrische Beeinflussung des Untergrundes und des Grundwassers aufzuzeigen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind gemeinsam mit den weiteren numerischen Untersuchungen in Kapitel 5.3 angeführt.

4.3.3. Feldversuche

Um die Eignung des entwickelten Konstruktionsbetons, neben den angeführten Laborversuchen auch auf seine praktische Anwendung hin zu prüfen, wurde ein Versuchsstand umgesetzt, welcher die Errichtung einer Schlitzwand im Kontraktorverfahren abbildet. Hierzu wurde eine Säulenschalung hergestellt. Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit des Betons durch die Mischanlage vor Ort musste das geplante Volumen reduziert werden. Eine planliche Darstellung der Versuche ist in Abbildung 10 gegeben.

Abbildung 10: Planung der Feldversuche – Schnitt 1-1 (links) und Grundriss (rechts)



Um die Anwendung des neu entwickelten Betons unter dem Kontraktorverfahren zu untersuchen, wurde die gezeigte Schalung mit einer Bentonit-Suspension mit einer Dichte zwischen 1,06 und 1,08 g/cm³ gefüllt, welcher die Suspensionsstützung einer Schlitzwand darstellt. Anschließend wurde der angemischte Beton mittels einer Pumpe in die Schalung von unten nach oben eingefüllt, während durch das Einfüllen die Bentonit-Suspension verdrängt wurde.

4.4. Untersuchung der Auswirkungen thermischer Speicher auf den Untergrund

Gemeinsam mit den Studien zu einem thermisch verbesserten Beton für geotechnische Zwecke, mit Fokus auf Wärmespeicher im Untergrund und den numerischen Studien zu derartigen Lösungen wurde weiters eine Aufbereitung der rechtlichen und technischen Anforderungen und Rahmenbedingungen zu derartigen Konstruktionslösungen vorgenommen. Letztere beziehen sich zu einem Großteil auf die Bedingungen, welche sich für das Grundwasser zufolge der Installation und Errichtung eines Wärmespeichers ergeben. Die Ergebnisse aus dieser Aufbereitung werden in den jeweiligen Kapiteln entsprechend angeführt und sind vor allem in den Schlussfolgerungen sowie dem Ausblick und den Empfehlungen in Kapitel 7 angeführt.

4.4.1. Anforderungen an Speicherbauwerke und Konstruktionen im Untergrund

Neben einer Aufbereitung der geotechnischen Konstruktionsbauteile, wie beispielsweise Schlitzwände und Bohrpfahlwände, wurde weiters die Anwendung anderer Bauteil- und Konstruktionsarten wie Fertigteile untersucht. Diese Untersuchungen hatten das Ziel, die Anwendungsgrenzen und Möglichkeiten zu erfassen und aufzubereiten.

Bei den Konstruktionsarten lag der Fokus hierbei zum einen auf der Dichtigkeit der Konstruktion, um eventuelle Wasserverluste aus dem Speicherinneren zu verhindern. Zum anderen wurden hierbei die Anforderungen an den zu verwendenden Beton aufbereitet, um diese für die Entwicklung eines thermisch verbesserten Betons und dessen Anwendung in der Geotechnik zu validieren.

Anfänglich wurden weiters die Anwendung und Nutzung von Fertigteilen betrachtet, welche die erforderlichen thermischen Eigenschaften aufweisen würden. Hierbei wurde eine kleine technische Machbarkeitsstudie durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 angeführt.

4.4.2. Nachhaltigkeitsbewertung einer Wärmespeicherkonstruktion

Spätestens seit der Veröffentlichung des sechsten Sachstandsberichts des Weltklimarats (IPCC2021) im Jahr 2021, der das zunehmende Bewusstsein für globale Erwärmung und Umweltbelastung durch die Menschheit forcierte, drängen Gesellschaft und Forschung in dieselbe Richtung: die Entwicklung von umweltfreundlichen Alternativen zu herkömmlichen Produkten. Aufgrund seiner enormen Produktionsmengen und seiner Kohlenstoffintensität ist Beton ein perfekter Kandidat, um im Hinblick auf die Quantifizierung dieser Emissionen und die Möglichkeiten, sie zu reduzieren untersucht zu werden. Im Zuge des Projektes wurde hierzu eine Ökobilanzierung der aktuell verwendeten Zementzusammensetzungen sowie der neu entwickelten Betonmischung vorgenommen.

Die Ökobilanz-Methode (engl. Life Cycle Assessment, LCA) wird verwendet, um potentielle Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen zu bestimmen. Eine LCA kann dabei helfen, Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltleistung von Produkten zu identifizieren, Entscheidungsträger über aktuelle Gefahren und mögliche Verbesserungsmöglichkeiten zu informieren (ISO 14040, 2006). Die Methode analysiert systematisch die Umwelteinflüsse von Produkten und Prozessen über deren gesamten Lebenszyklus.

Weiters wurde während der Projektumsetzung eine Methode untersucht, mit welcher eine Bewertung der Vorteile einer neuen Betonmischung für Schlitzwände vorgenommen werden kann.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 5.4.3 dargestellt.

5 Ergebnisse

Mit den in Kapitel 4 angeführten Untersuchungen, Betrachtungen und Studien wurde versucht, das in der Ausgangslage beschriebene und in Abbildung 3 dargestellte Konzept eines Wärmespeichers im Untergrund genauer zu untersuchen und zu betrachten. Der Fokus hierbei lag auf den Anforderungen und Möglichkeiten, welche sich durch einen thermisch verbesserten Konstruktionsbeton für die Herstellung der Umschließung, basierend auf der Anwendung durch eine Schlitzwandkonstruktion ergeben. Nachfolgend werden kurz die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt, um diese in den anschließenden Schlussfolgerungen und dem Ausblick und den Empfehlungen als Grundlage für erforderliche Anpassungen und Verbesserungen verwenden zu können.

Einleitend wird hierzu auf die Ergebnisse der neuen Betonzusammensetzung eingegangen, welche zudem in Laboruntersuchungen betrachtet wurden. Die Ergebnisse dieser waren die Grundlage für eine Reihe von numerischen Untersuchungen, welche sich auf die Auswirkungen eines Wärmespeichers auf den Untergrund und das Grundwasser beziehen.

5.1. Neue Betonzusammensetzung

Im Zuge des Projektes wurden eine Reihe von unterschiedlichen Betonzusammensetzungen und Betonarten untersucht. Schließlich wurde eine Betonrezeptur, basierend auf Beton mit Leichtzuschlägen verwendet, welche in Kapitel 5.1.3 näher beschrieben wird.

5.1.1. Schaumbeton

Zur Herstellung von Schaumbeton (vgl. Narayanan & Ramamurthy, 2000) muss ein stabiler Schaum erzeugt werden, der mit Bindemittelschlämme oder Frischmörtel vermischt wird. Obwohl der Prozess der Porenbildung bei Schaumbeton kontrollierbar ist, da keine chemische Reaktion stattfindet, ist die Frühfestigkeit des geformten Betons unzureichend, was zur Instabilität des Betons unter der Auflast des Wassers bzw. der Bentonitstützung führt. Schaumbeton ist daher für das Projekt nicht geeignet.

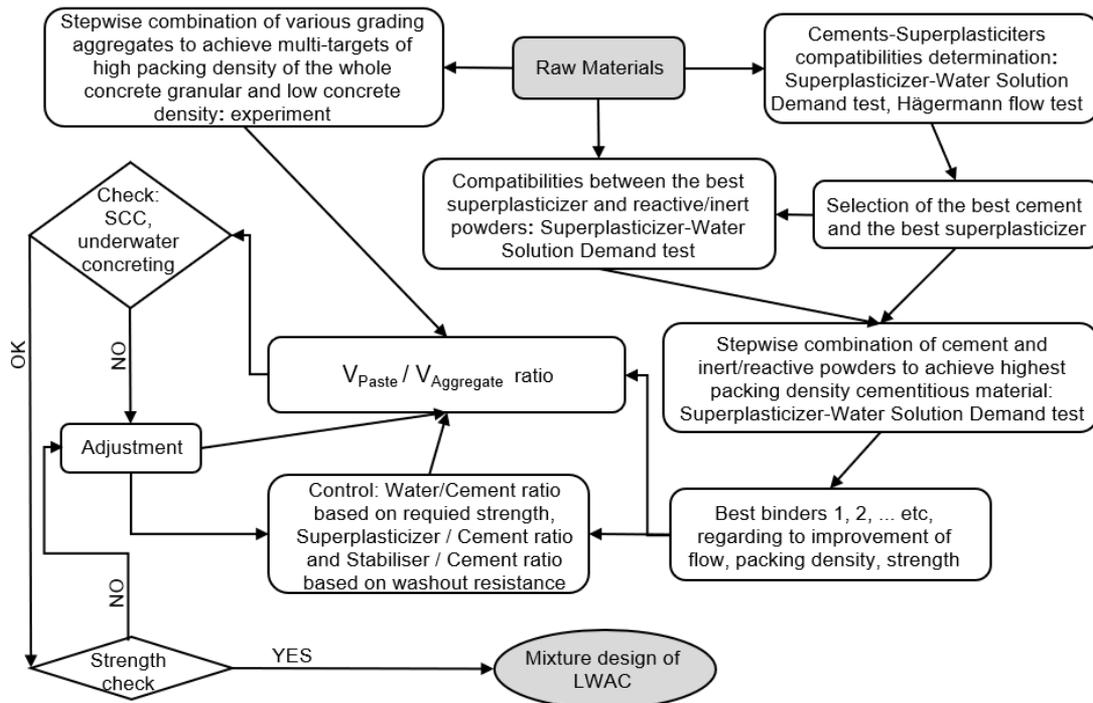
5.1.2. Porenbeton auf Zementbasis - Gasbeton

Der Expansionsvorgang aufgrund einer chemischen Reaktion ist der grundlegende Prozess zur Bildung von Gasbeton. Wenn Zementschlamm und Aluminiumpulver gemischt werden, wird eine chemische Reaktion zwischen Aluminium (Al) und Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Hydroxidgas in Gang gesetzt. Das freigesetzte Gas wird aufgrund der klebrigen Viskosität des Zementschlammes im Beton eingeschlossen und bildet verschiedene Luftporen mit unterschiedlichen Durchmesser von 1-2 mm. Während der Gasfreisetzung dehnt sich der Beton aus. Je größer das expandierte Volumen ist, desto geringer die Dichte des Betons. Die hohe Temperatur und die Wärme, welche während der chemischen Reaktion freigesetzt werden, können die Festigkeitsentwicklung des zementbasierten Porenbetons beschleunigen und die frühe Mikrostruktur des Betons verbessern, um das Eindringen von Wasser zu verhindern. Der hohe Druck auf die Oberfläche des Betons, welche sich auf Grund des Kontraktorverfahrens und der Verwendung von Stützflüssigkeiten bei geotechnischen Konstruktionen stellt, könnte jedoch zum Einsturz der Betonstruktur führen.

5.1.3. DW2-Mix – Beton mit Leichtzuschlägen

Wie in Kapitel 4.1 angeführt, wurde eine spezielle Betonrezeptur gesucht und entwickelt, welche sowohl die thermischen Anforderungen als auch die Vorgaben und Randbedingungen für eine Verwendung unter geotechnischen Zwecken erfüllt. Hierzu wurde ein Optimierungsansatz (Hoang, 2017) gewählt, welcher in Abbildung 11 dargestellt ist.

Abbildung 11: Verfahren zur Optimierung der Betonrezeptur (Hoang, 2017)



Die Ergebnisse dieser Optimierung in Bezug auf die thermischen Eigenschaften sind in Kapitel 5.2 dargestellt. Weiters sind die daraus folgenden Resultate in den numerischen Untersuchungen in Kapitel 5.3 berücksichtigt.

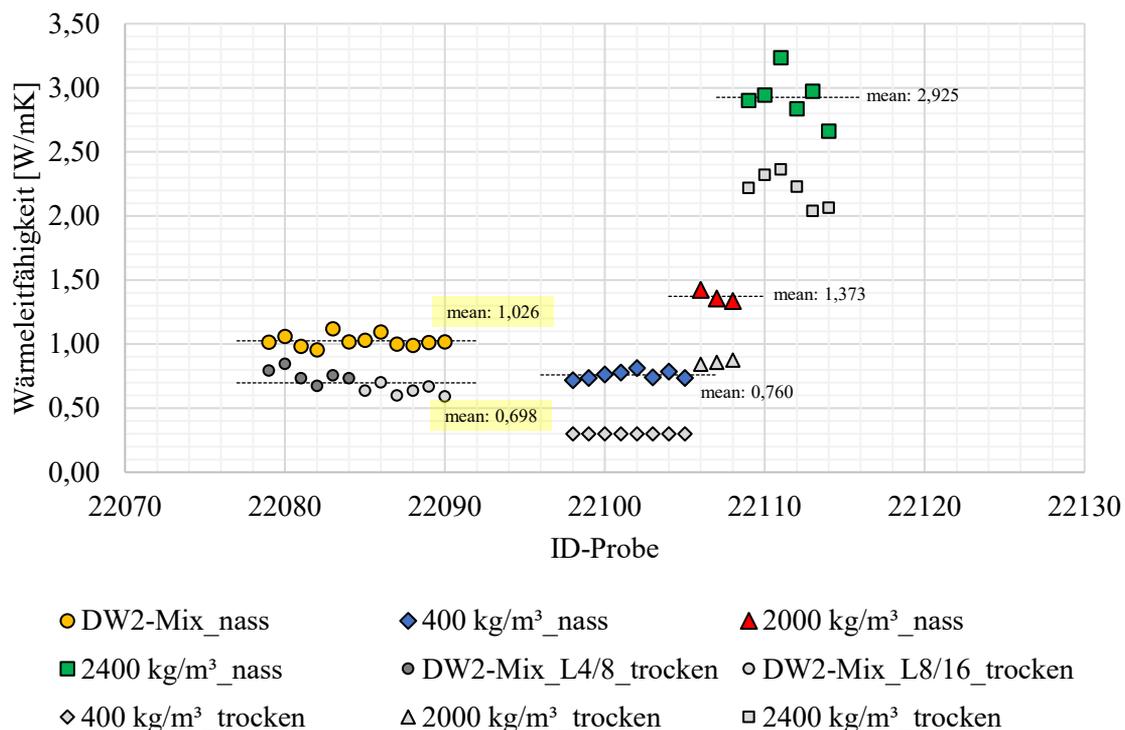
Weiters wurde die Eignung der Rezeptur in den durchgeführten Feldversuchen für das Betonieren im Kontraktorverfahren untersucht. Die Bentonit-Suspension wurde vollständig verdrängt und es konnte kein Entmischen des Betons oder Aufschwimmen der Blähtonzuschläge festgestellt werden. Um die Eignung des Betons zu validieren, müssen allerdings weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Beispielsweise sollte der Beton nach dem Erhärten auf dessen thermische Eigenschaften geprüft werden, um die Ergebnisse mit jenen aus den Laborversuchen zu vergleichen. Weiteres empfiehlt es sich Versuche in größerem Maßstab durchzuführen bzw. ein realistisches Betonieren im Untergrund zu untersuchen und hierbei auch die Auswirkungen einer Bewehrung bzw. von geotechnischen Spezifika (z.B. Abschaltrohr Schlitzwand) zu erfassen.

5.2. Ergebnisse der Laborversuche zur Wärmeleitfähigkeit

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der durchgeführten Laborversuche zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des entwickelten Betons, wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben. Insgesamt wurden 29 Proben in Form von Betonwürfeln auf deren thermische Eigenschaften hin untersucht. Es wurde zwischen feuchten und trockenen Probenkörpern unterschieden.

Abbildung 12 zeigt die Messergebnisse der Laborversuche für nasse und trockene Probekörper. Für jeden Betonwürfel wurden eine oder mehrere Messreihen mit jeweils 5 Einzelmessungen durchgeführt. Die Anzahl der Messreihen hängt primär von der Qualität der Ersten ab. War die Qualität der Ergebnisse der ersten Messreihe unzufriedenstellend, so wurden anschließend noch weitere Messreihen durchgeführt, bis die Versuchsergebnisse den Anspruch der Qualitätskontrolle erfüllten. Gänzlich unbrauchbare Messreihen wurden nicht dokumentiert und verworfen.

Abbildung 12: Ergebnisse zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten



Abhängig von der Anzahl der Prüfkörper je Betonart ergeben sich mehrere Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit. Beispielsweise wurden 3 Proben mit einer Dichte von 2.000 kg/m³ (nass) untersucht, was in 3 Mittelwerten (rote Dreiecke) resultierte. Aus diesen Werten wurde wiederum ein arithmetisches Mittel gebildet. Dieses stellt den Durchschnitt der Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden Betonart dar und ist als *mean*-Wert gekennzeichnet. Die Messergebnisse der nassen Proben sind farblich dargestellt, während jene der trockenen Würfel ausgegraut sind. Im Fall des DW2-Mix (nass) konnte, kein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlich großen Durchmessern der Blähtonzuschläge festgestellt werden. Nach der Trocknung ergibt sich allerdings eine Differenz von durchschnittlich ~ 0,120 W/mK. Spricht man von einer trockenen Probe, wird dementsprechend zwischen L4/8 und L8/16 differenziert. Die Messergebnisse für einen 400 kg/m³ schweren, trockenen

Beton weisen keine Unterschiede auf, da es mit der verwendeten Messeinheit nicht möglich war, die Wärmeleitfähigkeit festzustellen, was durch den Messbereich der Sonde begründet werden kann.

In Abbildung 12 wurde darauf verzichtet den *mean*-Wert für trockene Probenkörper darzustellen. Dieser und weitere zusätzliche Informationen können der detaillierten Zusammenstellung in Tabelle 1 entnommen werden. Die Messergebnisse in Abbildung 12 zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des DW2-Mix (nass), mit einem Wert von 1,026 W/mK, zwischen dem λ -Wert des Leicht- und Normalbetons (2.000 kg/m^3) liegt. Die Messergebnisse weisen, mit Ausnahme des 2.400 kg/m^3 schweren Betons, eine geringe Streuung auf. Weiters lässt sich eine ähnliche Streuung für nasse und trockene Proben erkennen. Die erhöhte Streuung der Messergebnisse (2.400 kg/m^3) lässt vermuten, dass die Genauigkeit der Messungen mit steigender Dichte des Baustoffes abnimmt – ein allgemeiner Ansatz hier zu, je höher die zu erwartende Wärmeleitfähigkeit, desto größer muss die Probe sein. Die Untersuchungen zeigen ebenso, dass ein nasser Prüfkörper eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist als ein trockener.

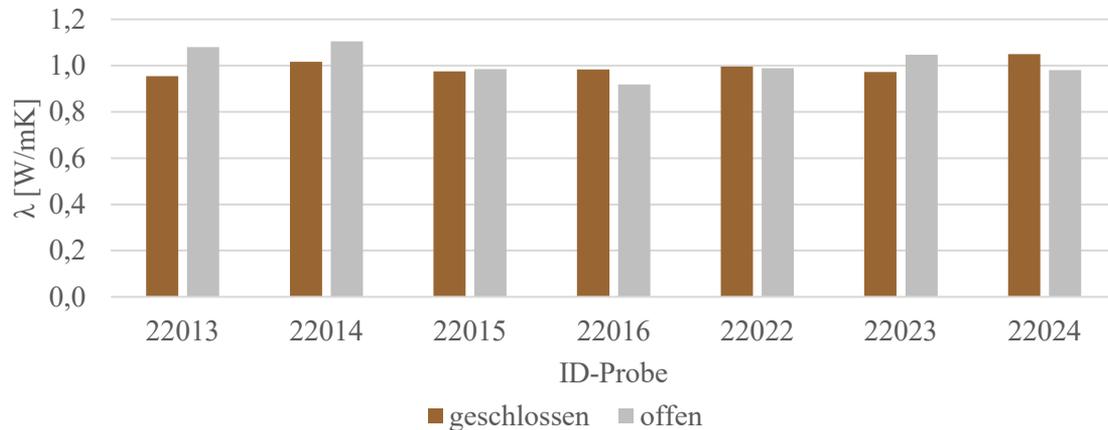
Die Herstellung der Proben fand durch das Zerschneiden eines größeren Betonwürfels statt. Dadurch wiesen nicht alle Oberflächen eines Prüfwürfels die gleichen Eigenschaften auf. Hierbei konnte zwischen geschlossenen – an der Schalung anliegenden – und offenporigen – durch das Zerschneiden hergestellten – Proben unterschieden werden. Die Darstellung in Abbildung 13 verdeutlicht dies. Das linke Bild zeigt die geschlossene Oberfläche des Prüfkörpers, wohingegen im rechten Bild die Struktur des Prüfkörpers bzw. die Körnung bzw. die Zementsteinmatrix deutlich zu erkennen ist. Hier kann neben dem Zementstein (grau) auch die Bindemittelmatrix in Form eines Leichtzuschlages (dunkel) erkannt werden.

Abbildung 13: Geschnittene Betonproben zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, geschlossene Oberfläche (links), offenporige Oberfläche (rechts)



Um einen Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Probe auf die Messergebnisse auszuschließen, wurden einige Stichproben doppelt untersucht. Dazu wurde die HLQ-Sonde (vgl. Abbildung 6 links) sowohl auf der geschlossenen als auch auf der offenen Oberfläche des Prüfkörpers befestigt. Abbildung 14 stellt die Ergebnisse der hierzu untersuchten Betonwürfel (7 Stück) grafisch dar. Die braunen Säulen beschreiben die Versuchsdurchführung auf der geschlossenen Seite der Probe (Abbildung 13 links), während die grauen Säulen die offene Seite (Abbildung 13 rechts) repräsentieren.

Abbildung 14: Unterschiede in den Messergebnissen zwischen einer geschlossenen und offenporigen Ausbildung der Prüfkörper



Die Untersuchung zeigte, dass sich kein eindeutiger Trend zwischen Messungen bei geschlossener oder offener Oberfläche abzeichnet. Einige der Proben zeigten beinahe idente Messergebnisse auf. Die maximale Schwankung lag bei 12%. Aufgrund der geringen Unterschiede wurde daher auf eine Unterscheidung der Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper verzichtet.

Um die Auswirkungen einer Durchfeuchtung des Betons zu erfassen, wie dies bei Schlitzwänden bzw. generell bei im Untergrund installierten Konstruktionen zu erwarten ist, wurde zudem eine Trocknung der Proben vorgenommen. Nachdem die Proben getrockneten wurden, konnte der Wassergehalt, wie in Abbildung 15 dargestellt, ermittelt werden. Aufgrund des hohen Wassergehalts von über 140 %, für einen Beton mit einer Dichte von 400 kg/m^3 , fällt die Wärmeleitfähigkeit nach der Trocknung stark ab. Dies resultierte in einem λ -Wert kleiner $0,3 \text{ W/mK}$. Um die Messergebnisse zu vervollständigen, wurde demnach ein Wert von $0,3 \text{ W/mK}$ für alle Proben (400 kg/m^3 , trocken) angenommen.

Abbildung 15: Wassergehalt der Proben

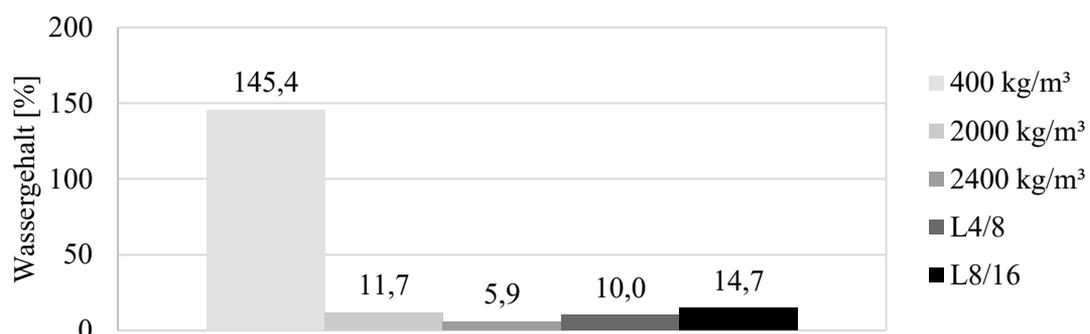
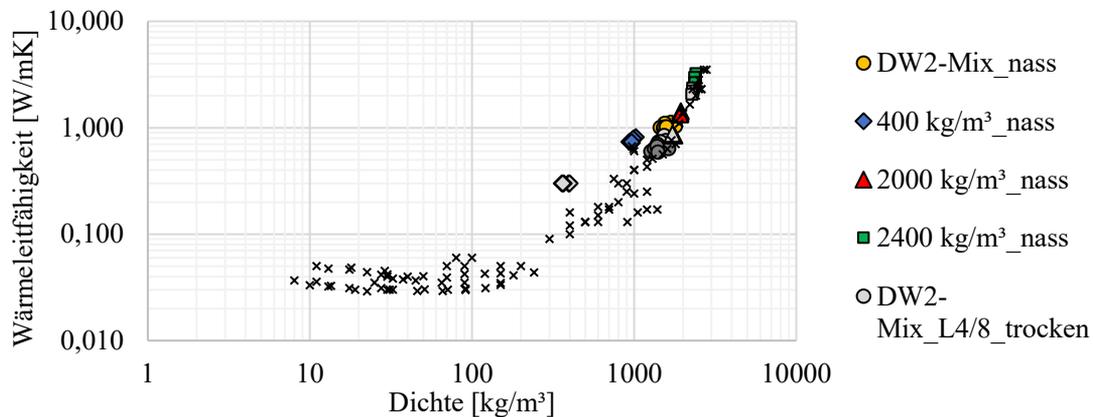


Tabelle 1: Ergebnisse der Laborversuche

Labor- nummer	ρ_{nass} [g/cm ³]	λ_{nass} [W/mK]	$\lambda_{\text{mean, nass}}$ [W/mK]	ρ_{trocken} [g/cm ³]	λ_{trocken} [W/mK]	$\lambda_{\text{mean, trocken}}$ [W/mK]	
DW2-Mix L4/8	22013	1,630	1,017	1,026	1,563	0,793	0,756
	22014	1,586	1,061		1,527	0,847	
	22015	1,595	0,984		1,413	0,734	
	22016	1,561	0,955		1,392	0,675	
	22017	1,681	1,121		1,568	0,756	
	22018	1,524	1,019		1,457	0,735	
DW2-Mix L8/16	22019	1,792	1,031	1,026	1,634	0,636	0,639
	22020	1,541	1,094		1,388	0,701	
	22021	1,450	1,001		1,266	0,598	
	22022	1,514	0,992		1,333	0,636	
	22023	1,533	1,014		1,384	0,668	
	22024	1,583	1,019		1,405	0,591	
400 kg/m ³	22098	0,968	0,720	0,760	0,395	< 0,3	< 0,3
	22099	0,936	0,736		0,398	< 0,3	
	22100	0,975	0,764		0,366	< 0,3	
	22101	0,981	0,778		0,394	< 0,3	
	22102	1,024	0,813		0,399	< 0,3	
	22103	0,949	0,741		0,358	< 0,3	
	22104	0,988	0,787		0,367	< 0,3	
	22105	0,962	0,738		0,363	< 0,3	
2.000 kg/m ³	22106	1,938	1,425	1,373	1,773	0,844	0,860
	22107	1,930	1,357		1,724	0,859	
	22108	1,925	1,336		1,723	0,876	
2.400 kg/m ³	22109	2,403	2,901	2,925	2,314	2,219	2,206
	22110	2,394	2,944		2,321	2,321	
	22111	2,403	3,234		2,296	2,365	
	22112	2,383	2,836		2,297	2,229	
	22113	2,363	2,975		2,291	2,039	
	22114	2,372	2,662		2,271	2,063	

Als Referenzproben (400, 2.000 und 2.400 kg/m³) wurden gängige Betontrockenrohdichten gewählt. Für diese wurden zudem bereits in anderen Projekten bzw. der gängigen Literatur (ÖNORM EN 12524, 2000) Untersuchungen bzgl. der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Hierbei ist jedoch oftmals nicht bekannt, ob es sich um trockene oder feuchte Proben handelt. Um die durchgeführten Laboruntersuchungen dennoch mit bisher bekannten Ergebnissen gegenüberstellen zu können, wurde eine, wie in Abbildung 16 gegebene, Darstellung in einem halblogarithmischen Diagramm vorgenommen.

Abbildung 16: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte



Das Diagramm bildet die in Tabelle 1 dargestellten Messergebnisse in Abhängigkeit der Dichte der Proben (Betonwürfel) in einer halblogarithmischen Skalierung ab. Zusätzlich zu den erzielten Messergebnissen, wurden mehrere Vergleichswerte, welche durch schwarze Kreuze markiert sind, in das Diagramm eingefügt. Diese wurden aus ÖNORM EN 12524 (2000), Krapfenbauer (2009) und Domínguez-Muñoz *et al.* (2010) entnommen. Die Vergleichswerte sollen eine polynomische Funktion abbilden bzw. andeuten, um zu überprüfen, inwiefern die Messergebnisse mit der Literatur übereinstimmen. Die durch die Laborversuche erzielten Kennwerte decken sich zum Großteil mit der Parabel. Lediglich die Messergebnisse 400 kg/m³ (nass) und 400 kg/m³ (trocken) weisen eine Diskrepanz auf. Die nassen Proben (400 kg/m³) weisen eine etwas zu hohe Wärmeleitfähigkeit bzw. eine zu geringe Dichte auf. Die Abweichungen sind allerdings gering. Im Fall der trockenen Probe (400 kg/m³) kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit deutlich unter der Messgrenze der verwendeten Sonde liegt. Wie bereits erwähnt wurde für diese Proben eine Wärmeleitfähigkeit von 0,3 W/mK (minimal messbare Wärmeleitfähigkeit) angenommen, da die Versuche keine verwertbaren Ergebnisse lieferten. Zusammenfassend zeigt ein Vergleich, dass die erzielten Messergebnisse, mit Ausnahme der nassen Proben (400 kg/m³), dem Trend der Literatur – Zusammenhang zwischen Dichte und Wärmeleitfähigkeit – folgen.

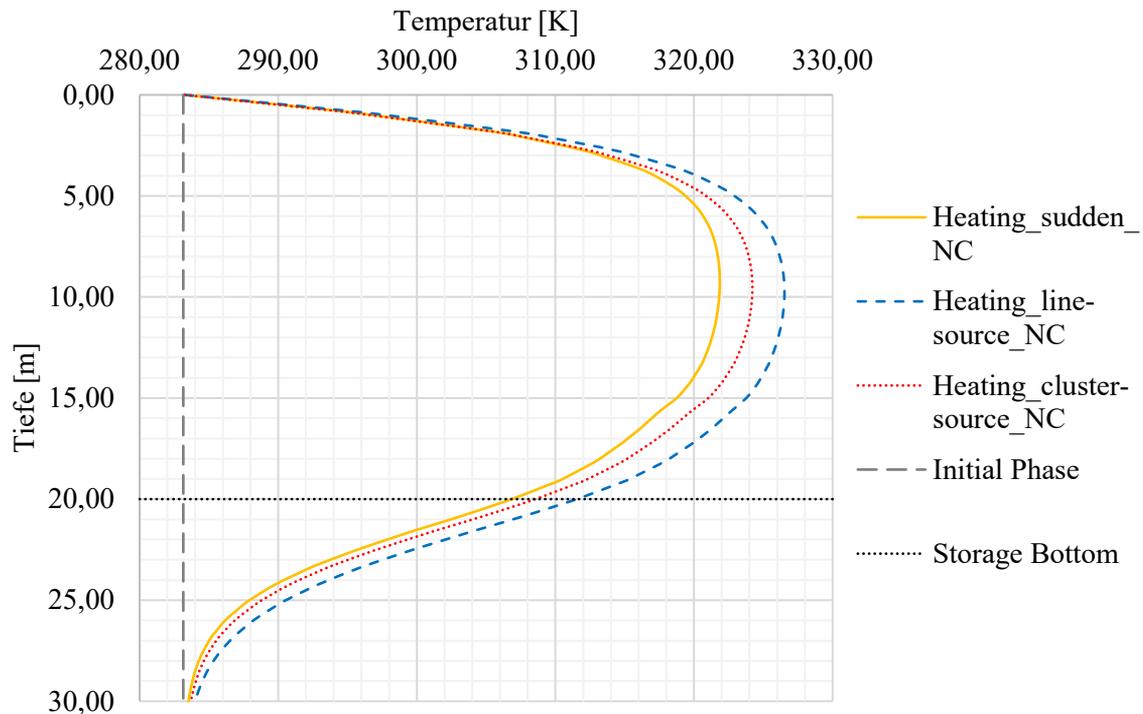
5.3. Ergebnisse numerische Untersuchungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der numerischen Betrachtungen, welche im Zuge des Projektes durchgeführt wurden, näher erörtert. Zum einen wurde hier der Einfluss der Materialien und der Geometrie der Umschließungskonstruktion des Speichers in Form einer Schlitzwandkonstruktion betrachtet. Diese Betrachtungsweise wurde dabei auf Ebene der Temperatursausbreitung im direkten Umfeld des Speichers vorgenommen. Zum anderen wurde in weiterer Folge auch die Auswirkung eines Speichers auf das umliegende Grundwasser betrachtet. Der Fokus hierbei lag auf der Ausbreitung von Wärmefahnen im Untergrund.

5.3.1. Einfluss der Modellierung der Heizphase

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Modellierungsansätze auf die Berechnungsergebnisse zu eruieren, wurde der Temperaturverlauf im Vertikalschnitt B (in 2 m Entfernung von der Schlitzwand) untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt.

Abbildung 17: Einfluss der Heizphase auf die Temperaturentbreitung im Untergrund

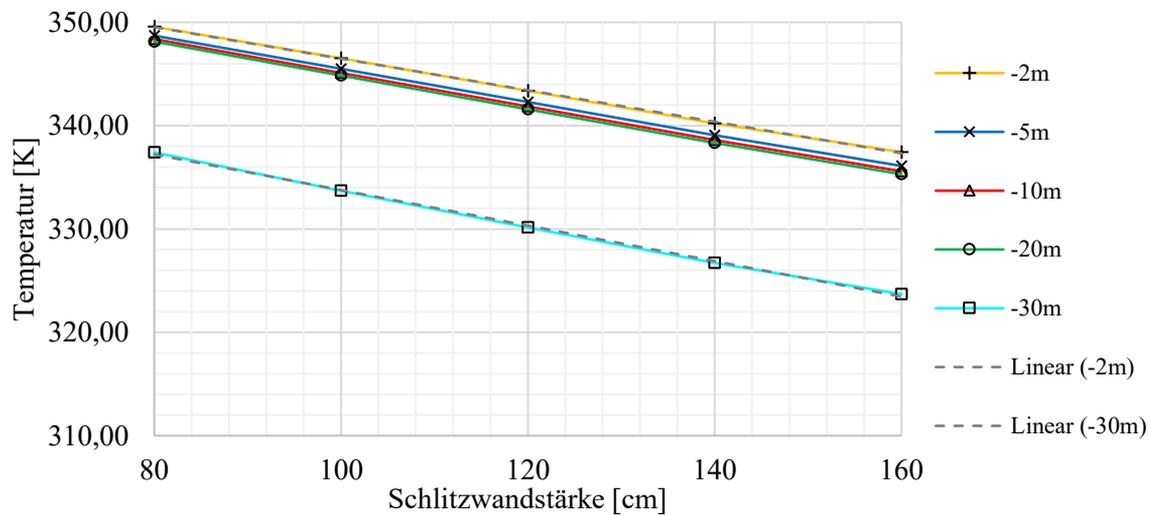


Die Untersuchungen zeigen, dass ein Einfluss der Art der Modellierung der Heizphase auf die Endergebnisse besteht. Im untersuchten Beispiel fällt dieser allerdings gering aus. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass der Einfluss durch den Speicher ab dessen Unterkante (grau strichlierte Linie) gleichmäßig abnimmt.

5.3.2. Einfluss der Schlitzwandbreite

Im Zuge der Untersuchungen wurde generell eine Schlitzwandbreite von 100 cm angenommen. Wie beschrieben, hängt der Wärmetransport durch die Schlitzwand unter anderem von der Wandstärke – bzw. des Wärmedurchgangs der gesamten Konstruktion - ab. Um den Einfluss der Schlitzwandbreite auf die Temperatur im Untergrund zu eruieren, wurde die Temperatur an der Außenseite der Schlitzwand als maßgebender Faktor herangezogen. Hierzu wurde ein Modell mit einer Variation von Wandstärken 80, 100, 120, 140, 160 cm berechnet und die Ergebnisse evaluiert. Anschließend wurde die Temperatur des Untergrundes in 2, 5, 10, 20 und 30 m Tiefe untersucht.

Abbildung 18: Zusammenhang Schlitzwandstärke und Untergrundtemperatur



Das Diagramme in Abbildung 18 veranschaulicht den linearen Zusammenhang zwischen Schlitzwandbreite und Untergrundtemperatur. Um diesen zu verdeutlichen wurden zusätzlich lineare Trendlinien (grau strichliert) eingefügt. Vergleicht man diese mit den Ergebnissen der Studie zeigen sich kaum Abweichungen. Dieser Zusammenhang ist unabhängig vom verwendeten Beton.

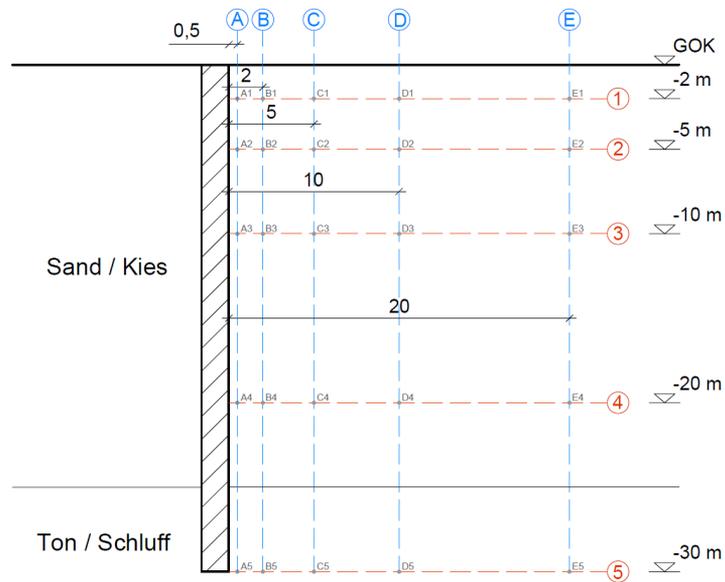
5.3.3. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Betons

Wie bereits beschrieben, wurden umgrenzende Schlitzwände modelliert, um die Speicherverluste und somit die Erwärmung des umgebenden Untergrundes zu minimieren. Daher wurde der Einfluss der thermischen Eigenschaften des Schlitzwandbetons auf den Temperaturverlauf im Untergrund untersucht. Zu diesem Zweck wurde das bereits detailliert beschriebene Modell als Referenz herangezogen und unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Betonarten berechnet. Hierzu wurden folgende Parameter verwendet:

- Normalbeton: $\lambda=2,00$ W/mK, $c=1.000$ J/kgK, als NC bezeichnet;
- DW2-Mix: $\lambda=1,026$ W/mK, $c=1.000$ J/kgK, als LC bezeichnet.

Der Fokus liegt dabei auf der Evaluierung der verbesserten Dämmwirkung des neu entwickelten Betons (DW2-Mix). Um die Berechnungsergebnisse übersichtlicher darzustellen, wurde eine einheitliche Schnittdarstellung gewählt. Diese ist durch die Schnitte A bis E in Abbildung 19 schematisch dargestellt.

Abbildung 19: Schnittführung zur Darstellung der Temperaturverteilung



Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde hier keine Variation der Schlitzwandbreite bzw. anderer Parameter vorgenommen. Die Ergebnisse der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften des Betons für die Schlitzwandkonstruktion sind in Abbildung 20 zu erkennen.

Abbildung 20: Gegenüberstellung zwischen Normalbeton und DW2-Mix

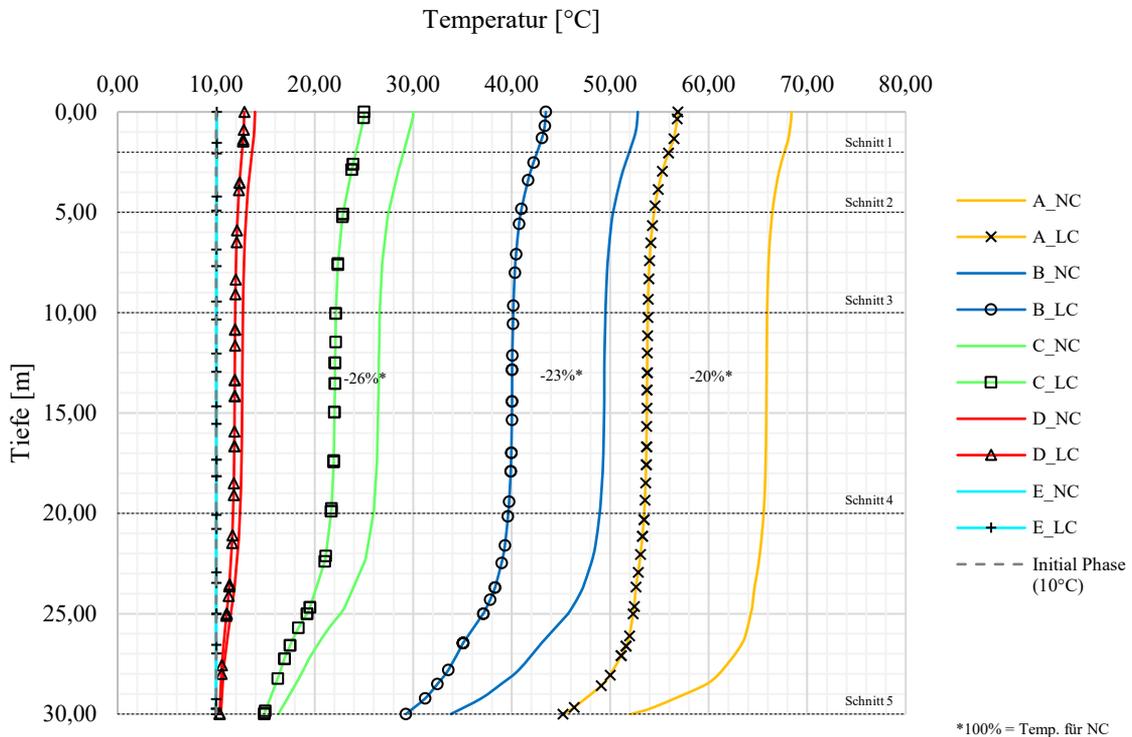


Abbildung 20 stellt die vertikalen Temperaturverläufe außerhalb des Speichers nach einer Betrachtungsdauer von 150 Tagen dar. Als maßgebend wurden die in Abbildung 19 definierten

Schnitte (A bis E) herangezogen. Die horizontalen, schwarz punktierten Linien repräsentieren die horizontalen Schnitte 1 bis 5. Die vertikale, grau strichlierte Linie stellt die anfängliche Untergrundtemperatur (*Initial Phase*) von 10°C dar. Um den Einfluss der thermischen Eigenschaften des Betons zu eruieren, wurden die Temperaturverläufe für NC und LC (markierte Kurven) abgebildet. Die Untersuchung zeigte, dass sich die Temperatur im Schnitt E (dem am weitesten entfernten) nicht von jener der *Initial Phase* unterscheidet. Aufgrund der kurzen Betrachtungsdauer bleibt die Untergrundtemperatur in diesem Bereich unverändert. Die Temperatur im Schnitt D zeigt lediglich eine Erwärmung von ~ 2 K und kaum einen Unterschied zwischen NC (Normalbeton) und LC (DW2-Mix). Die Schnitte A, B und C, welche sich im Nahbereich der Schlitzwand befinden, zeigen deutlichere Unterschiede im Vergleich mit der *Initial Phase*. Vor allem aber erzielt die Verwendung des DW2-Mix (LC) eine wesentliche Verringerung der Untergrundtemperatur. Um die verbesserte Dämmwirkung des DW2-Mix darzustellen wurde der Temperaturunterschied zwischen NC und LC mittels Prozentangaben ausgedrückt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Einfluss des DW2-Mix auf die Untergrundtemperatur - 100cm Schlitzwandbreite

Nr.	Variable			A_{max}	B_{max}	C_{max}
1	$\vartheta_{\text{Soil, NC}} (100\%)$	-	°C	67,64	51,57	28,69
2	$\vartheta_{\text{Soil, LC}}$	-	°C	55,91	42,21	23,91
3	$\vartheta_{\text{Initial Phase}}$	-	°C	10,00	10,00	10,00
4	$\Delta\vartheta_{\text{Soil, NC-Initial Phase}}$	1-3	°C	57,64	41,57	18,69
5	$\Delta\vartheta_{\text{Soil, LC-Initial Phase}}$	2-3	°C	45,91	32,21	13,91
6	Verringerung ϑ_{Soil}	1-(5/4)	%	20	23	26

Dazu wurde zuerst die maximale Temperatur (A_{max} , B_{max} und C_{max}) im signifikanten Bereich für jeden Schnitt (A bis B) bzw. für NC und LC ermittelt. Als signifikant wurde der Bereich unterhalb des Grundwasserspiegels (-2 m) angenommen. Nachfolgend wurde die Differenz zwischen der Maximaltemperatur und der Initial Phase berechnet. Abschließend wurde die erzielte Verringerung der Untergrundtemperatur durch den Einsatz des DW2-Mix ermittelt. Hierbei repräsentiert $\vartheta_{\text{Soil, NC}}$ den Bezugswert (100%).

Die grünen Kurven (Schnitt C) stellen den Temperaturverlauf 5 m entfernt von der Schlitzwand dar. In diesem Bereich erzielt man eine Verringerung der Temperatur des Untergrundes von 26%. Die Temperaturverläufe in Schnitt B (2 m entfernt) werden durch die blauen Kurven abgebildet. Der Vergleich NC-LC zeigt eine 23%ige Abnahme der Untergrundtemperatur. Die gelben Kurven repräsentieren die Temperaturverläufe 0,5 m neben der Schlitzwand. In diesem Bereich verringert sich die Temperatur im Untergrund um 20%.

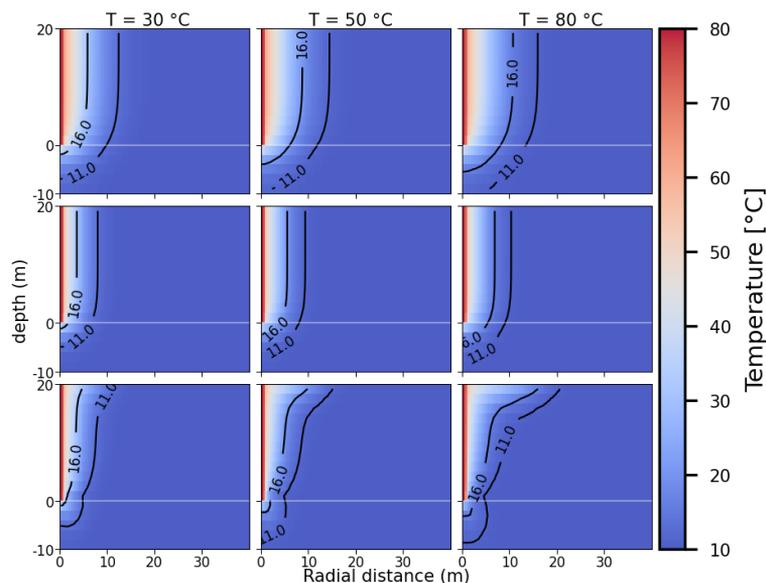
Weitere Ergebnisse zu diesen Untersuchungen sind der Masterarbeit von Schleicher Julian (2022) zu entnehmen.

5.3.4. Einfluss des Wärmespeichers auf den Untergrund

Um die Ausbreitung der Wärme im Untergrund – unter Berücksichtigung der Strömung – zu untersuchen wurden unterschiedliche Modelle aufgestellt. Hierbei wurden Temperaturregime von 30, 50 und 80 °C bewertet.

Jedes Modell wurde verwendet, um die Wärmeübertragung vom Inneren des UTES durch die Schlitzwand und die Ausbreitung der Fahne im umgebenden Grundwasser zu simulieren. Bei dieser Simulation wurde ein hydraulischer Gradient zwischen innerhalb und außerhalb des UTES von Null angenommen, wodurch die Wärmeübertragung durch Advektion minimiert wurde. Abbildung 21 zeigt die Bedingungen nach 150 Tagen. Die Reichweite der Temperaturfahne mit dem maximal zulässigen Anstieg der Grundwassertemperatur von 10 °C auf 16 °C ist durch die schwarzen Isolinien dargestellt.

Abbildung 21: Temperaturverteilung (°C) für verschiedene Temperaturregime

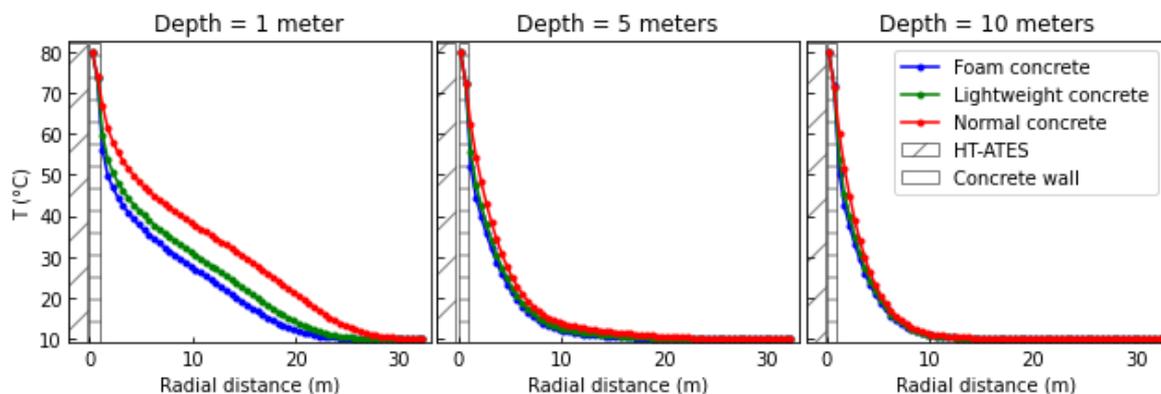


Diese Darstellung zeigt die Auswirkungen bei Vernachlässigung bestimmter thermischer Prozesse im Zuge der Modellierung der Wärmeausbreitung in porösen Medien. Beim Vergleich der Ergebnisse der Reihen 1 und 2 dehnt sich die Wärmefahne in Reihe 1 weiter aus, da in Reihe 2 der Temperaturengleich zwischen Flüssigkeit und Feststoff im Aquifer dazu führt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturfront langsamer ist als die Abstandsgeschwindigkeit. In beiden Szenarien (Reihen 1 und 2) ist eine vertikale Wärmefront zu beobachten, während die Wärmefront in Reihe 3 geneigt ist. Dies ist auf die dichtebedingte Grundwasserströmung zurückzuführen, die sich aus der geringeren Dichte des Wassers bei höheren Temperaturen ergibt. Die Konvektion ist in der Nähe der Schlitzwände am stärksten und bewirkt die Kippung der ursprünglich vertikalen Wärmefront. Dies ist am besten bei 80 °C zu erkennen, wo die dichtegetriebene Strömung am stärksten ist. Schout et al. (2016) zeigten, dass die hohen Temperaturunterschiede zwischen dem erhitzten Grundwasser in der Nähe der UTES-Wände und dem umgebenden Grundwasser zu einer Aufwärtsströmung in der Nähe der UTES-Wände führen. Wenn das erwärmte Wasser den oberen Teil des Grundwasserleiters erreicht, ändert es seine Richtung weg vom UTES-System. Am Boden des Grundwasserleiters wird das erwärmte Wasser durch kälteres Grundwasser aus der Umgebung ersetzt,

wodurch sich der Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Schlitzwand erhöht. Dadurch entsteht ein höheres Temperaturgefälle, das zu einem höheren Wärmeübergang nach außen durch Wärmeleitung führt und die Energieeffizienz des Systems senkt.

Um die Auswirkungen verschiedener Betonmaterialien und der damit verbundenen Eigenschaften auf die Ausbreitung der Wärmefahne zu testen, wurden drei Modellläufe durchgeführt. Der Modellaufbau beinhaltet ein hydraulisches Gefälle von Null mit einer UTES-Temperatur von 80°C. Die Temperaturprofile wurden in 1, 5 und 10 m Tiefe analysiert, welche in Abbildung 22 dargestellt sind. Aufgrund der Konvektion wurden in den unteren Schichten nur geringe Abweichungen der Temperaturentwicklung festgestellt. Deutlichere Unterschiede wurden in der oberen Schicht beobachtet, wobei die Temperaturentwicklung bei der Verwendung von Normalbeton eine deutlich größere Ausdehnung zeigte. Geringfügige Abweichungen zwischen Schaum- und Leichtbeton sind zu erkennen, was auf das große Potenzial technischer Lösungen der Wärmedämmung hinweist.

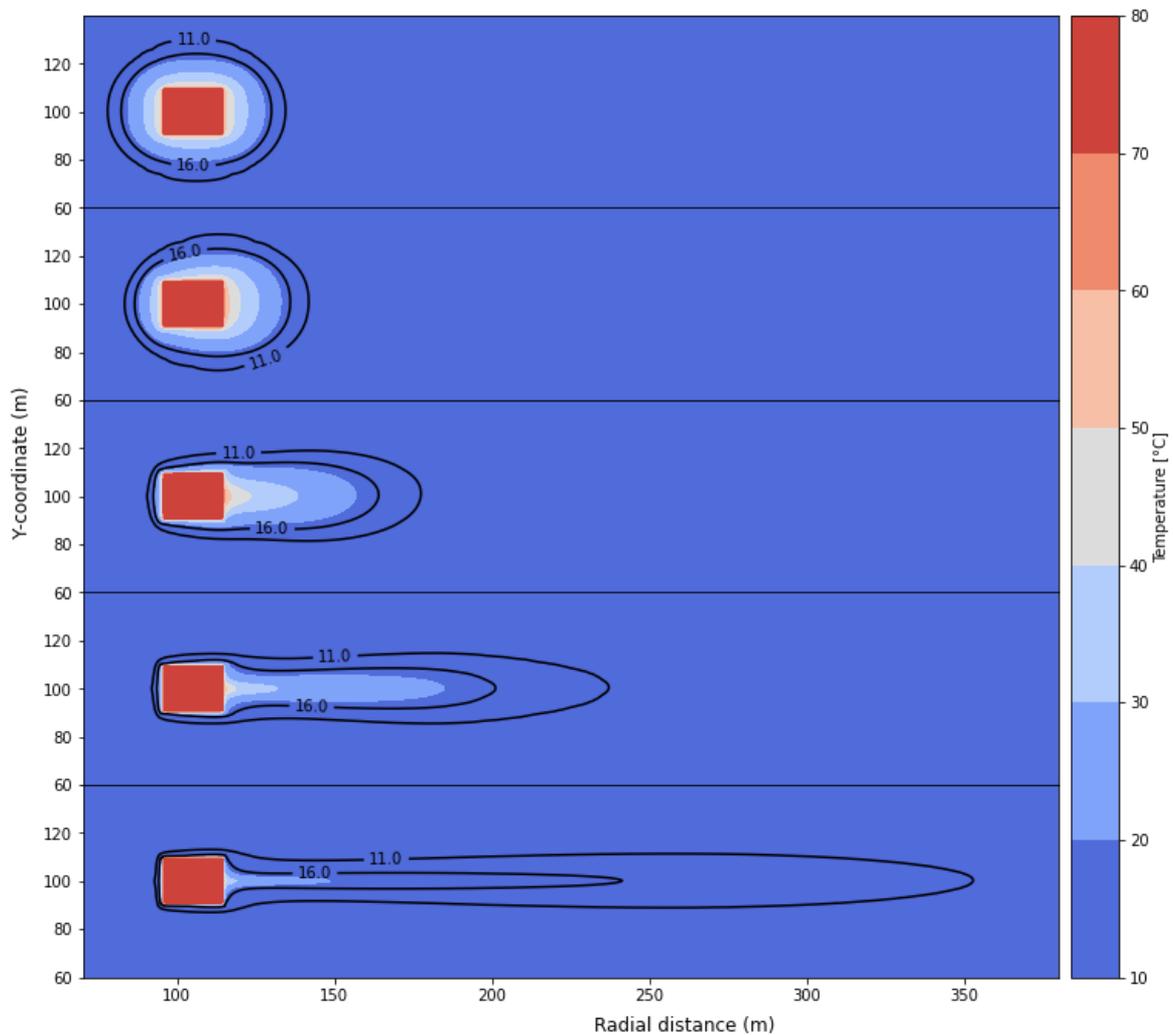
Abbildung 22: Temperaturprofil bei unterschiedlichen Betonmaterialien



Die in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellten Ergebnisse basieren auf einer zweidimensionalen Untersuchung. Zudem wurden derartige Untersuchungen an einem dreidimensionalen Modell betrachtet. Hierzu wurden fünf Szenarien nach ihrer jeweiligen Peclet-Zahl klassifiziert, welche den Energietransport durch Flüssigkeitsbewegung mit dem Energietransport durch Wärmeleitung in Beziehung setzt (das Verhältnis zwischen Wärmekonvektion und Wärmekonduktion).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 anhand der Grundrisse dargestellt, welche die Auswirkungen der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung der Wärmefahne zeigen. Es ist eine erhebliche Zunahme der Ausbreitung der Wärmefahne in Szenarien mit $Pe > 5$ zu beobachten. Dies zeigt sich sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen Ausbreitung der Wärmefahne. In diesen Szenarien breitet sich die Wärmefahne hauptsächlich in Strömungsrichtung aus, während auf der linken Seite des UTES eine geringfügige Wärmeausbreitung durch Konduktion zu beobachten ist. Bei größeren Grundwassergefällen ist auch die Wirkung der dichtegetriebenen Strömung geringer. Eine höhere Grundwasserströmung kann sich daher auch auf die Effizienz der UTES auswirken, da ein größeres Temperaturgefälle an den Umschließungswänden einen größeren Wärmefluss mit Wärmeleitung von der Innenseite des UTES nach außen bewirkt.

Abbildung 23: Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung der Wärmefahne



5.4. Ergebnisse Auswirkungsuntersuchungen

Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen Studien und den weiteren, im Zuge des Projektes durchgeführten Untersuchungen, wird nachfolgend eine Zusammenfassung der Auswirkungsuntersuchungen vorgenommen.

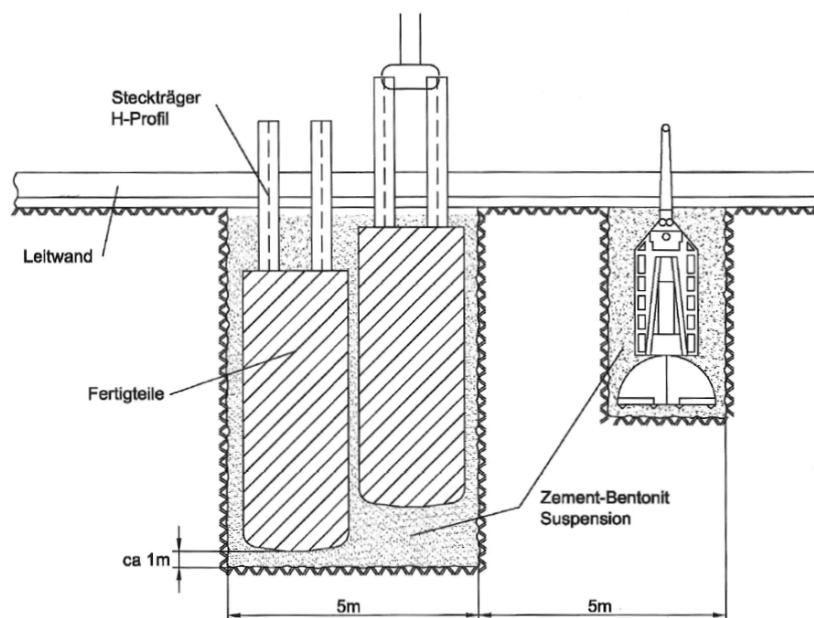
5.4.1. Geotechnische Konstruktionselemente

Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die Entwicklung und Verbesserung von neuen, thermisch verbesserten Schlitzwandmaterialien zu einer Verbesserung der Speicherfunktion und der Beeinflussung des Untergrunds und des Grundwassers führen können. Vor allem im Zuge der numerischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass hier ein umfassendes Potential zur Reduktion der thermischen Verluste des Speichers möglich ist. Weiters konnte mit den Labor- und Feldversuchen sowie der damit einhergehenden Entwicklung eines thermisch verbesserten Konstruktionsbetons für geotechnische Zwecke gezeigt werden, dass neben einer thermischen Verbesserung auch weiterhin die erforderlichen Anforderungen an die Herstellbarkeit gegeben ist.

5.4.2. Verwendung von Fertigteilen

Fertigteile sind Bauteile, die an einem Ort, welcher nicht der endgültige Bestimmungsort ist, vorab hergestellt werden. Abbildung 24 zeigt die Herstellung einer Fertigteil-Schlitzwand. Angelehnt an das Einphasen-Verfahren wird der Schlitz durch eine erhärtende Suspension gestützt. Nach dem Aushub wird das Fertigteil in den Schlitz eingehoben. Der Schlitz wird meist 1 m tiefer als nötig ausgehoben. Dies liegt an den Schlammablagerungen am Boden des Schlitzes. Diese können trotz des abgerundeten Endes des Fertigteils nie vollständig verdrängt werden. Aufgrund des hohen Gewichts und möglicher Transporteinschränkungen eines Fertigteils können maximal 20 m tiefe Schlitzwände mit einer derartigen Bauweise umgesetzt werden (Triantafyllidis, 2004).

Abbildung 24: Schema zum Einsatz von Fertigteilen bei Schlitzwänden (Triantafyllidis, 2004)



Die begrenzte Tiefe einer solchen Konstruktion verhindert die Ausführung von tiefen UTES Systemen. Dementsprechend nehmen Fertigteil-Schlitzwände keine vorrangige Rolle bei der Herstellung von Speicherumschließungen ein. Jedoch könnte beispielsweise durch Teilfertigteil und dem Einsatz eines thermisch verbesserten Füllbetones ein Mehrwert generiert werden. Neben den Problemstellungen der Tiefe ist bei Fertigteilen auch die Herstellung von dichten Bauteilfugen sowie die Verbindung zwischen dem Untergrund und dem Bauteil eine noch nicht gelöste Problemstellung. Aus diesem Grund wurde dieses Konzept in der vorliegenden Arbeit nicht weiterverfolgt.

5.4.3. Nachhaltigkeitsbewertung

Bei der Durchführung der Nachhaltigkeitsbewertungen wurden eine Vielzahl von Parametern wie die Masse des erforderlichen Betons, die Transportentfernungen und die Zusammensetzung der einzelnen Betone angenommen. Dies war erforderlich, um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Betonsorten für die Errichtung eines Wärmespeichers zu betrachten. Die Ergebnisse hieraus sind in den nachfolgenden Abbildungen zu erkennen.

Abbildung 25: Global Warming Potential (kgCO₂eq) für 1m³ je betrachteter Betonsorte

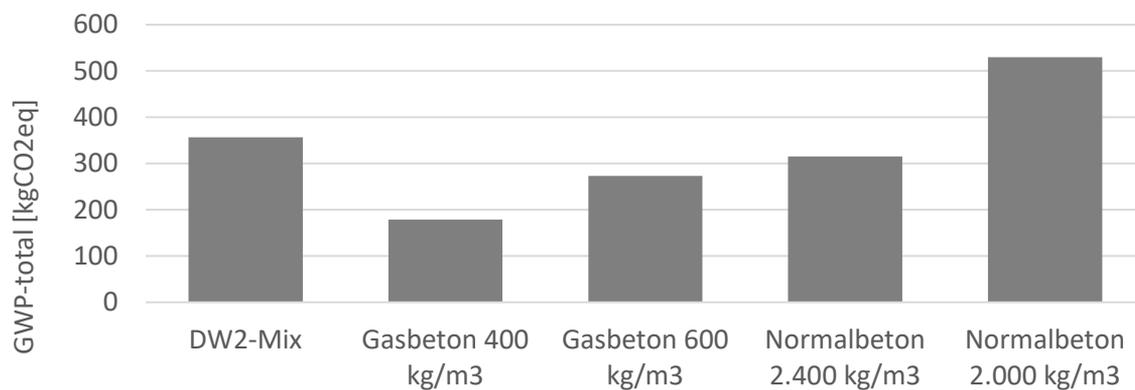
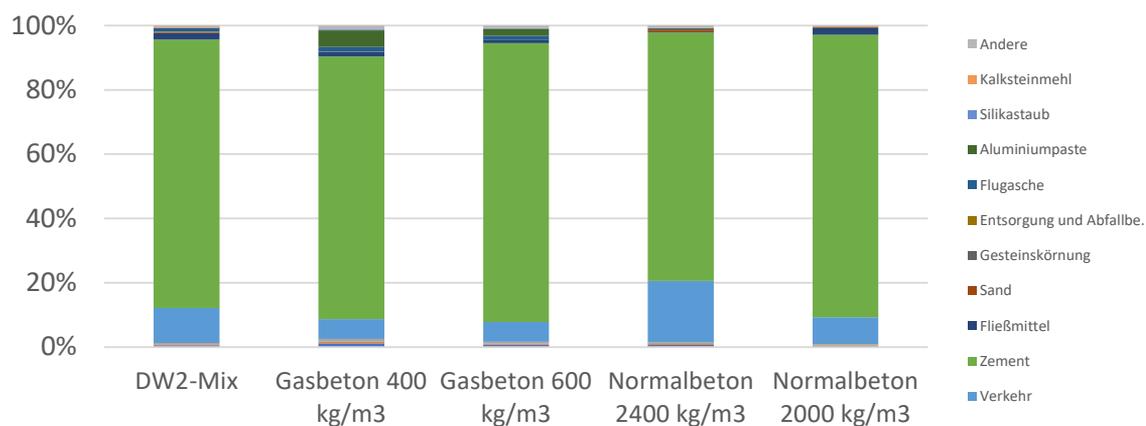


Abbildung 26: Beitrag der Materialien zum Erderwärmungspotential



Wie erwartet leisten Zemente den größten Beitrag zum Treibhauspotenzial aller Mischungen, gefolgt vom Transport zum Hersteller. Bei ausschließlicher Berücksichtigung der Umweltleistung pro m³ schnitten Gasbeton-Mischungen aufgrund ihres geringen Zementanteils am besten ab. Da diese Mischung jedoch nicht für eine Schlitzwand verwendet werden kann, ist es notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Vorteile der neu entwickelten Betonsorte zutreffend einschätzen kann.

Um die Umwelteinflüsse daher noch genauer zu untersuchen, wäre es notwendig, eine Fallstudie durchzuführen in welcher eine Schlitzwand, basierend auf der neu entwickelten Betonmischung, direkt mit einer Schlitzwand aus Normalbeton mit zusätzlicher Dämmung verglichen wird.

Hierzu gibt es jedoch noch keine Betriebsdaten für die Nutzungsphase eines Grundwasserspeichers mit einer energetisch verbesserten Schlitzwandkonstruktion. Zudem entstehen aufgrund der angenommenen Systemgrenze keine Kosten für die Kostengruppen Instandhaltungs- und Wartungskosten sowie End-of-life-Kosten, wodurch von einer Umsetzung einer Lebenszykluskostenberechnung abgesehen wurde. Zusätzlich stellen sich, nicht zuletzt durch die gegenwärtigen Krisen, die finanzmathematischen Berechnungsparameter, wie zum Beispiel Inflationsrate, Kalkulationszinssatz, Baupreisindizes Energiepreissteigerungsrate hoch volatil dar. Daher ist die Aussagenkraft gegenwärtiger Lebenszykluskostenberechnungen stark eingeschränkt.

5.4.4. Auswirkungen eines Wärmespeichers auf das Grundwasser

Gemeinsam mit den in den vorherigen Kapiteln angeführten numerischen Untersuchungen wurden auch die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Errichtung von derartigen Konstruktionen erhoben und zusammengefasst. Neben der Aufbereitung dieser Themenstellung wurden diese Erhebungen auch vorgenommen, um die Grenzwerte und Randbedingungen bei den durchgeführten Simulationen und Betrachtungen einschätzen zu können. Aus diesem Grund wurden auch die angeführten Parameterstudien und Sensibilitätsanalysen durchgeführt, um die Schwankung der Ergebnisse in Bezug auf die Grenzwerte einschätzen zu können. Nachfolgend findet sich eine kurze Auflistung der Ergebnisse dieser Aufbereitungen.

Eine zusätzliche anthropogene Wärmeeinleitung in das Grundwasser kann sich direkt und indirekt auf die Wasserqualität auswirken, da die meisten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Grundwasser temperaturabhängig sind. Die physikalischen Eigenschaften des Grundwassers (Viskosität, Dichte, Kompressibilität) sind temperaturabhängig und wirken sich auf das Grundwasserströmungsregime aus (Schout et al., 2016). Aus chemischer Sicht können Temperaturerhöhungen zu einer veränderten Löslichkeit verschiedener Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase führen, was sich in der Änderung des hydrochemischen Zustands und der ökologischen Verhältnisse im Grundwasser widerspiegeln kann und letztendlich aufgrund bspw. von Ausfällungen auch das Strömungsregime beeinflussen kann. Eine erhöhte Grundwassertemperatur kann auch direkt auf die Vermehrung, das Wachstum und das Überleben von Lebewesen im Grundwasser und im Boden Auswirkungen haben (Hähnlein et al., 2013). Eine wesentliche Herausforderung bei Wärmespeichersystemen in Grundwasserleitern ist die Gefahr von Leckagen, die das Risiko einer starken Temperaturbeeinflussung des umliegenden Grundwassers erhöhen (Kallesøe et al., 2019).

Um schädliche und unerwünschte Auswirkungen auf das Grundwasser zu vermeiden, sollten bei Planung, Bau und Betrieb solcher Anlagen einheitliche Bewirtschaftungsgrundsätze beachtet werden. In Österreich stellt das "ÖWAV Regelblatt 207" (ÖWAV-RB 207, 2009) die wichtigsten Richtlinien für die thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrundes dar, während das österreichische Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959) das entsprechende rechtliche Instrument ist. Einer wasserrechtlichen Bewilligung für hochtemperierte Hybridspeicher bedarf es, wenn nachstehende Voraussetzungen vorliegen:

- nach **§32 Abs. 2b WRG 1959**, falls Einwirkungen auf Gewässer durch ionisierende Strahlung oder Temperaturänderung stattfinden;
- nach **§31 Abs. 1c WRG 1959** wenn ein Brunnen gebaut wird.

Falls die oben angeführten Paragraphen keine Wirksamkeit haben, ist zu beachten, dass kein fremdes Recht verletzt werden darf, wie nachstehend aufgelistet (zur einfacheren Lesbarkeit wurde auf eine direkte Zitation verzichtet):

§ 56 Abs. 1 WRG 1959: *Vorübergehende Eingriffe in den Wasserhaushalt, wie zum Beispiel Pumpversuche oder wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Versuche in der freien Natur, bedürfen einer Bewilligung der Wasserrechtsbehörde, wenn eine Beeinträchtigung öffentlicher Interessen oder eine Verletzung bestehender Rechte (§ 12) zu befürchten ist.*

§ 56 Abs. 2 WRG 1959: *Im Übrigen finden darauf alle Bestimmungen dieses Bundesgesetzes, die für Wasserbenutzungsanlagen gelten, einschließlich der Bestimmungen über die Zwangsrechte sinngemäß Anwendung.*

§12 Abs. 1 WRG 1959: *Das Maß und die Art der zu bewilligenden Wasserbenutzung ist derart zu bestimmen, dass das öffentliche Interesse (§ 105) nicht beeinträchtigt und bestehende Rechte nicht verletzt werden.*

Für das Erreichen der wasserrechtlichen Vorgaben wurden Richtlinien erarbeitet, die im ÖWAV-Regelblatt 207 zusammengefasst sind. Die nachstehenden **wasserwirtschaftlichen Grundsätze** sind bei der Planung, Ausführung und Inbetriebnahme von Anlagen, welche zur direkten oder indirekten thermischen Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds verwendet werden, zu berücksichtigen. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Grundwasser ist flächendeckend als Trinkwasser zu erhalten. „*Inbesondere ist Grundwasser sowie Quellwasser so reinzuhalten, dass es als Trinkwasser verwendet werden kann*“ § 30 WRG, 1959.
- Bei thermischer Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds darf deren Temperatur großräumig nicht nachteilig verändert werden.
- Die thermische Nutzung des Grundwassers ist auf oberflächennahes Grundwasser mit freiem Grundwasserspiegel zu beschränken.
- Grundwasser ist nach der thermischen Nutzung vollständig in den Aquifer, aus dem es entnommen wurde, rückzuleiten, sofern es nicht als Nutzwasser weiterverwendet wird.
- Eine Verunreinigung des Grundwassers durch wassergefährdende Stoffe oder eine sonstige nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit muss verlässlich verhindert werden.
- Der Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden soll durch entsprechende architektonische und bauphysikalische Gestaltung und Wärmedämmung minimiert werden.
- Es dürfen nur Wärmeträgermedien und Arbeitsmittel eingesetzt werden, welche bei unbeabsichtigtem Austritt (Leckagen) keine nachhaltigen schädlichen Folgen für Mensch und Umwelt nach sich ziehen. Dies ist am besten durch den Einsatz von reinem Wasser oder von CO₂ gewährleistet.
- Material, das in den Untergrund eingebaut wird, muss korrosionssicher und mechanisch beanspruchbar sein. Für den Brunnenausbau sind Vollrohre und Filterrohre zu verwenden, die korrosionsgeschützt sind. Rohre, Filterkies, Quellton, Zement usw. müssen für den Einsatz im Grundwasser geeignet sein und dürfen die Grundwasserqualität nicht beeinträchtigen.
- Bei Dauer-Betriebstemperaturen über 30 °C ist der Werkstoff Polyethylen (PE) 100 nicht mehr geeignet und es sind höherwertige Werkstoffe einzusetzen.

Diese Grundsätze sollen vor nachteiligen bzw. unerwünschten Auswirkungen schützen und eine sparsame und effiziente Nutzung von Grundwasser sicherstellen. Bei der Errichtung von Wärmespeichern im Untergrund betreffen diese Grundsätze hauptsächlich, wenn eine Wärmeentnahme durch abstromige Grundwasserförderung geplant ist und diese Wärmequelle dem Hybridspeicher zugeführt wird („heat reuse“). Generell weist oberflächennahes, anthropogen unbeeinflusstes Grundwasser in einer Tiefe von ca. 7 m (unter GOK) eine Temperatur zwischen 7 und 12 °C auf. Erst unterhalb von 15 bis 20 m Tiefe unter GOK treten keine jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen mehr auf. Dies ist aber in fast jedem urbanen Raum ungültig, da hier anthropogen Einflüsse vorliegen.

Die generellen Richtlinien des ÖWAV-Regelblatts 207 sind im Wesentlichen dann gültig, wenn abstromig der Hybridspeicher die „Abwärme“ als zusätzliche Energiequelle für den Speicher genutzt werden soll. Dies sind:

- am Punkt der Einleitung des thermisch genutzten Grundwassers in den Untergrund sollte eine Temperatur von 5°C nicht unterschritten und eine Temperatur von 20°C nicht überschritten werden;
- wird die Grundwassertemperatur durch Oberflächenwässer jahreszeitlich wesentlich abgesenkt, kann die Temperatur von 5°C unterschritten werden. Zusätzlich ist bei der Festlegung der Einleittemperatur die Immissionssituation zu berücksichtigen;
- maximal zulässige Aufwärmung/Abkühlung des genutzten Grundwassers am Punkt der Einleitung darf 6 K nicht überschreiten – ausgehend von der vorhandenen Grundwassertemperatur am Anlagenstandort.
- thermische Auswirkungen auf das Grundwasser sind bei rechnerischen Temperaturänderungen von < 1 K zu vernachlässigen.

Für die Planung, die Errichtung und den Betrieb einer Anlage zur thermischen Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds ist die Kenntnis der nachstehend genannten geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im mittelbaren und unmittelbaren Einwirkungsbereich notwendig. Hierbei sind folgende Punkte zu beachten:

- Geologie und Hydrogeologie des unmittelbaren Projektgebiets (zu erwartende Untergrund- und Grundwasserverhältnisse);
- Lage und Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels, gegebenenfalls Grundwasserschichtenpläne;
- Grundwasserströmungsrichtung und Gefälle des Grundwasserkörpers;
- Charakteristik der stauenden und leitenden Schichten in hydrogeologischer und lithologischer Hinsicht;
- Grundwasser-Stockwerke (frei, gespannt, artesisch) und deren Zusammenhang;
- physikalische und chemische Eigenschaften des Grundwassers in den verschiedenen Grundwasser-Stockwerken;
- Schichtaufbau des Untergrunds;
- maßgebende Schichteigenschaften (Bodenart, Art des Locker-/ Festgesteins, Eignung als GW-Stauer/-Leiter, ev. Angaben zu Lagerungsdichten, Konsistenzen, Verbandsfestigkeiten, Klüftigkeit, Verkarstungsmöglichkeit etc.);
- natürliche und künstliche Hohlräume (z.B. Karsthohlräume, Stollen, unterirdische Bergbauanlagen, Weinkeller, Tunnel etc.).

Nach den österreichischen Normen ist die thermische Nutzung des Grundwassers in der Schutzzone I (unmittelbare Zone um die Entnahmebohrung) nicht und in den Schutzzonen II und III nur eingeschränkt zulässig (Stauffer et al., 2019).

6 Schlussfolgerungen

Nachfolgend wird, basierend auf den in Kapitel 5 angeführten Ergebnissen eine Zusammenfassung zu den Schlussfolgerungen des Projektes gegeben. Hierzu wird lediglich kurz auf die technische und rechtliche Umsetzung eines Wärmespeichers im Untergrund eingegangen.

6.1. Technische Umsetzung

Mit der Optimierung der Mischung bzw. der Optimierung der Betonzusammensetzung zu einem thermisch verbesserten Konstruktionsbeton für geotechnische Zwecke konnte gezeigt werden, dass eine thermische Verbesserung der Eigenschaften eines Betons möglich ist und dieser dabei trotzdem für die Herstellung von Schlitzwänden oder Pfahlkonstruktionen verwendet werden kann. Jedoch wurden hierbei folgende Punkte erkannt:

- Die Dämmeigenschaften sind im trockenen Zustand höher als im feuchten Zustand, woraus folgend bei einer Installation im Untergrund mit einer Reduktion der Funktionalität gerechnet werden muss.
- Trotz seines hohen Anteils an leichten Zuschlägen erzielt der entwickelte Beton ausreichende Festigkeiten, um für geotechnische Zwecke verwendet werden zu können.
- Es findet keine Entmischung der leichten Zuschläge statt, woraus folgend sich der Beton für die Anwendung im Kontraktorverfahren eignet.
- Die Laborversuche zeigten, dass hier vertiefte Untersuchungen erforderlich sind, um eine zutreffende Aussage zu den thermischen Eigenschaften zu erhalten und diese für Analysen und Berechnungen heranziehen zu können.

Gemeinsam mit der Entwicklung einer verbesserten und optimierten Betonzusammensetzung wurden numerische Studien durchgeführt, mit welchen der Einfluss eines Wärmespeichers auf den Untergrund betrachtet wurde. Hierbei konnte sowohl für den Untergrund als auch für den Grundwasserkörper gezeigt werden, dass derartige Wärmespeicher einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturverteilung im Untergrund haben. Hierzu ist jedoch die Verwendung hochwertiger Stoffgesetze erforderlich und es ist eine explizite Berücksichtigung der Randbedingungen und Modellgrenzen erforderlich. Die durchgeführten Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen zeigten, dass es hier eine Reihe von Randbedingungen gibt, welche entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Anhand der durchgeführten Studien konnte die Komplexität einer UTES Simulation verdeutlicht werden. So haben die gewählten thermischen Eigenschaften des umgebenden Untergrundes einen signifikanten Einfluss auf die Erwärmung des Bodens und des Grundwassers. Zukünftige Analysen erfordern eine detaillierte Erfassung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität des Untergrundes, um die entsprechenden Eigenschaften des Bodens bestmöglich in der Simulation abzubilden. Werden die Berechnungen mit einer konstanten Speichertemperatur durchgeführt, kann das Modell deutlich kleiner dimensioniert werden, um die Berechnungszeit zu verkürzen. Um zukünftige Simulationen von TES Systemen möglichst realitätsnah durchführen zu können, wären

Funktionen für die Energiezufuhr und -abgabe vorteilhaft. Die bisherigen Untersuchungen konnten keine Be- und Entladungsvorgänge des Speichers berücksichtigen. Weiters muss eine Grundwasserströmung berücksichtigt werden, um den Energieverlust durch die Umströmung des Speichers miteinzubeziehen. Abschließend wären Speichersimulationen über mehrere Jahre von großem Interesse, um Langzeiteffekte im Boden bzw. im Speicher zu evaluieren.

6.2. Rechtliche Umsetzung

Die, im Zuge der numerischen Untersuchungen als Begleitmaßnahme vorgenommene Aufbereitung der rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Nutzung des Untergrundes als Wärmespeicher, zeigten, dass hier mit erheblichen Problemstellungen zu rechnen ist. Zum einen ist dies durch den erforderlichen Schutz des Grundwassers vor negativen Auswirkungen definiert. Zum anderen bildet der aktuelle Stand der Technik in der Rechtslage nur bedingt die Nutzung des Untergrundes als Wärmespeicher ab. Vor allem zufolge des zweiten Punktes ist hier mit erheblichen Einschränkungen bei der Konzeptionierung, Planung und rechtlichen Umsetzung von Wärmespeichern im Untergrund zu rechnen.

6.3. Anforderungen und Problemstellungen

Wie aus den Ergebnissen und Erkenntnissen des Projektes ersichtlich wurde, kann mit einer thermischen Optimierung der Eigenschaften eines Konstruktionsbetons für geotechnische Zwecke das Potential von Untergrundspeichern verbessert werden. Jedoch sind hierzu vor allem die Problemstellungen im Zusammenhang mit der Erwärmung des Untergrundes und der Nutzung und Beeinflussung des Grundwassers entsprechend anzupassen. Derartige Anpassungen fehlen aktuell, um hier einen Mehrwert und eine umfassende Anwendung derartiger Speicherlösungen zu ermöglichen. Dennoch zeigten die Untersuchungen und Studien, dass durch geotechnische Konstruktionen ein Beitrag zu Untergrundwärmespeichern geschaffen werden kann.

7 Ausblick und Empfehlungen

Das Projekt DW2 stellte Grundlagenuntersuchungen zur Wärmespeicherung im Untergrund an, welche sich auf die Errichtung von Underground Thermal Energy Storage Systems konzentrierte. Dabei wurde aufgezeigt, dass mit einer thermischen Verbesserung des Betons für Umschließungsbauwerke wie Schlitzwände oder Bohrfahlwände ein deutlicher Einfluss auf die Funktionalität und Effektivität derartiger Konstruktionen gegeben ist.

7.1. Wärmespeicherung im Untergrund

Zufolge der Auswirkungen des Klimawandels, der Forderungen nach nachhaltiger Energiebereitstellung, zur Eindämmung der Klimawandeleffekte und zur Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wird die Errichtung von Wärmespeichern in den kommenden Jahren zunehmen. Hierzu können die Entwicklungen und Erkenntnisse dieses Projektes durchaus Verwendung finden. Neben der optimierten Betonzusammensetzung können hier vor allem die durchgeführten numerischen Studien aufzeigen, welche Bandbreite an Rahmenbedingungen und welche Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Hierzu ist jedoch eine umfassendere Aufarbeitung der thermischen Kennwerte des Untergrundes und eine zutreffendere Aufbereitung von numerischen Modellierungsprozessen erforderlich, um dies zu ermöglichen.

7.2. Auswirkungen von thermischen Speichern auf den Untergrund

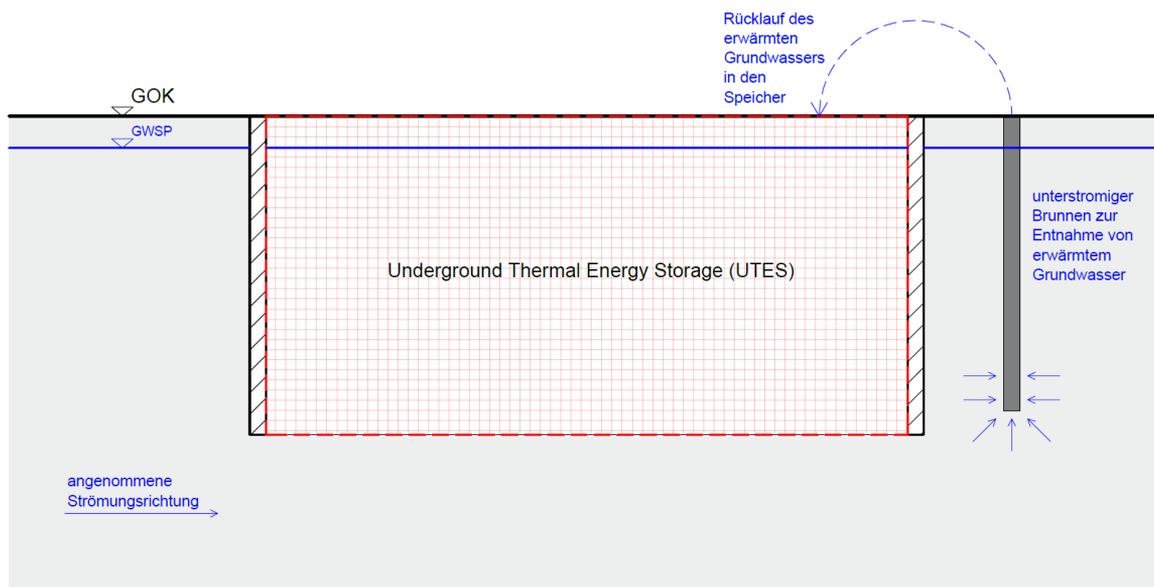
Um die Nutzung von Wärmespeichern im Untergrund zu ermöglichen wäre es zudem erforderlich, deren Auswirkungen auf das Grundwasser zu erfassen. Neben der Erfassung der Auswirkungen auf das umliegende Grundwasser, sowie deren Analyse und dem entsprechenden Entwurf des Speichers, sollten hierbei auch die rechtlichen Anforderungen entsprechend angepasst werden. Hierbei sollte der Schutz des Grundwassers – und die damit einhergehende Bereitstellung von Trinkwasser – als oberstes Ziel betrachtet werden, jedoch müssen hierbei die Möglichkeiten und positiven Effekte von Wärmespeichern im Untergrund in Kontext gesetzt werden.

7.3. Mögliche Verbesserungen und neue Konstruktionsformen bei Wärmespeichern im Untergrund

Die numerischen Untersuchungen zeigten, dass es bei der Errichtung und Nutzung von Wärmespeichern im Untergrund zu einer möglichen Beeinflussung kommt, welche sich nachteilig auf das Milieu und den Zustand des Grundwassers auswirken können. Zwar bietet das, wie in Abbildung 3 dargestellte Konzept eines Wärmespeichers bei Anwendung entsprechender Dämm Lösungen, wie beispielsweise dem entwickelten Konstruktionsbeton, neben der Einsparung und der Reduktion der Verluste auch Vorteile in Bezug auf die Erwärmung des Untergrundes. Wie die numerischen Untersuchungen jedoch zeigten, ist es damit nicht möglich, eine nachteilige Beeinflussung des Untergrundes zu verhindern.

Abbildung 27 zeigt eine mögliche Ausführung eines UTES Systems, um derartigen Problemstellungen zu begegnen. Der Speicherinhalt wurde mit Schlitzwänden umschlossen und die Grundwasserströmungsrichtung wurde (hier schematisch) von links nach rechts angenommen, wobei man davon ausgehen kann, dass sich das Grundwasser durch die Umströmung des Speichers entsprechend erwärmt.

Abbildung 27: Lösungsvorschlag Grundwassererwärmung - Brunnenlösung



Nach der Umströmung des Speichers wird das erwärmte Grundwasser über einen Brunnen bzw. eine Reihe von Brunnen entnommen und anschließend wieder in den Speicher eingeleitet. Eine stete Ableitung des zu stark erwärmten Grundwassers soll verhindern, dass sich eine Grundwasserfahne ausbildet, die den Untergrund stromabwärts unnötig erwärmt. Mit einer derartigen Vorgehensweise könnte vor allem die in Kapitel 5.4.4 angeführte Problemstellung in Bezug auf eine unzulässige Erwärmung des Untergrundes und des Grundwassers durch eine technische Lösung entsprechend ausgeschlossen werden. Zudem könnte damit die Effektivität des Speichers durch eine Reduktion der Wärmeverluste erhöht werden. In einer weiteren Folge könnte diese Herangehensweise auch dazu verwendet werden, um bei innerstädtischen Speichern zusätzliche Energiequellen zu gewinnen. Vor allem durch die Zunahme der Bildung von Wärmeinseln könnte so eine nachhaltige und den Effekten des Klimawandels entgegengewirkende Speichertechnologie entwickelt werden.

Um die in diesem Kapitel angeführten Empfehlungen und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für neue bzw. optimierte Speichertechnologien und die daraus folgende Nutzung des Untergrundes als Wärmespeicher umsetzbar zu gestalten, wären weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erforderlich, welche vor allem die Eigenschaften des Untergrundes und die Ausbreitung von Wärme im Untergrund und dem anstehenden Grundwasser betreffen.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung thermischer Speicher nach dem Speichermedium (Falkner, 2014).....	12
Abbildung 2: Arten von Wärmespeichern (Ochs, 2013).....	13
Abbildung 3: Schema eines thermisch verbesserten UTES Systems.....	14
Abbildung 4: Korrelation zwischen der Trockendichte von Porenbeton und der Wärmeleitfähigkeit (rechts) und der Druckfestigkeit (links) (Miccolia et al., 2015)	15
Abbildung 5: Einrichtung zur Messung der Wärmekapazität, Mischungskalorimeter (links), Durchflusskalorimeter (rechts), (Hannoschöck, 2018).....	18
Abbildung 6: HLQ-Sonde im Zuge der Versuche, Sonde auf einem Kalibrierstück (links), Versuchsaufbau in einem Kühltankschrank (rechts)	19
Abbildung 7: Blähtonzuschlag L8/16 (links) & L4/8 (rechts).....	20
Abbildung 8: Darstellung des verwendeten PLAXIS Modells zur numerischen Simulation	21
Abbildung 9: Konzeptionelles Modell eines UTES-Speichers	23
Abbildung 10: Planung der Feldversuche – Schnitt 1-1 (links) und Grundriss (rechts).....	24
Abbildung 11: Verfahren zur Optimierung der Betonrezeptur (Hoang, 2017)	27
Abbildung 12: Ergebnisse zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten	28
Abbildung 13: Geschnittene Betonproben zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, geschlossene Oberfläche (links), offenporige Oberfläche (rechts)	29
Abbildung 14: Unterschiede in den Messergebnissen zwischen einer geschlossenen und offenporigen Ausbildung der Prüfkörper	30
Abbildung 15: Wassergehalt der Proben	30
Abbildung 16: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte.....	32
Abbildung 17: Einfluss der Heizphase auf die Temperaturentwicklung im Untergrund.....	33
Abbildung 18: Zusammenhang Schlitzwandstärke und Untergrundtemperatur.....	34
Abbildung 19: Schnittführung zur Darstellung der Temperaturverteilung	35
Abbildung 20: Gegenüberstellung zwischen Normalbeton und DW2-Mix	35
Abbildung 21: Temperaturverteilung (°C) für verschiedene Temperaturregime	37
Abbildung 22: Temperaturprofil bei unterschiedlichen Betonmaterialien.....	38
Abbildung 23: Einfluss der Grundwasserströmung auf die Ausbreitung der Wärmefahne.....	39
Abbildung 24: Schema zum Einsatz von Fertigteilen bei Schlitzwänden (Triantafyllidis, 2004)	40
Abbildung 25: Global Warming Potential (kgCO ₂ eq) für 1m ³ je betrachteter Betonsorte.....	41
Abbildung 26: Beitrag der Materialien zum Erderwärmungspotential.....	41
Abbildung 27: Lösungsvorschlag Grundwassererwärmung - Brunnenlösung	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Laborversuche.....	31
Tabelle 2: Einfluss des DW2-Mix auf die Untergrundtemperatur - 100cm Schlitzwandbreite.....	36

Literaturverzeichnis

ACI-213R. (2014). ACI 213R-14: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute.

Anderson, M.P. 2005; Heat as a ground water tracer. *Groundwater* 43, 951–968.

Baehr, H. D. und Kabelac, S. (2006), *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen mit zahlreichen Tabellen*, Springer-Lehrbuch, 13., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Bentley Systems (2020), *PLAXIS 2D: Reference Manual*, Bentley Systems.

Boley, C. (2019), *Handbuch Geotechnik: Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen*, 2. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Borri, E., Zsembinszki, G. und Cabeza, L. F. (2021), „Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment: A bibliometric analysis and systematic review“, *Applied Thermal Engineering*, 189. Jg., S. 116666.

Bott, C., Dressel, I. und Bayer, P. (2019), „State-of-technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems“ , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113. Jg., S. 109241.

CEN-EC2_1_1. (2009). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Betontragwerken - Teil: 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Bau*.

Domínguez-Muñoz, F., Anderson, B., Cejudo-López, J. M. und Carrillo-Andrés, A. (2010), „Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials“, *Energy and Buildings*, 42. Jg., Nr. 11, S. 2159–2168.

Falkner, S. (2014), „Modellierung und Simulation von thermischen Speichern“ , Technische Universität Wien, 2014.

Hannoschöck, N. (2018), *Wärmeleitung und -transport: Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung*, Springer Vieweg, Berlin.

Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P. 2013; Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925.

Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P. 2010; Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. *Groundwater* 48, 741–756.

Hoang, K. H. (2017). *Dissertation: A Systematic Mix Design Approach for Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*. Institut für Konstruktiven Betonbau - Technische Universität Graz.

IPCC. (2021). *IPCC, 2021: Summary for Policymakers*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

ISO 8301 (1991), Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus, Schweiz. International Organization for Standardization.

ISO 14040. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO 14040:2006. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.

Kallesøe, A.J., Vangkilde-Pedersen, T., Guglielmetti, L. 2019; HEATSTORE Underground Thermal Energy Storage (UTES)–state-of-the-art, example cases and lessons learned.

Krapfenbauer, T. (2009), Bautabellen, 17. Aufl., Verlag Jugend & Volk GmbH, Wien.

Langevin, C.D., Thorne Jr, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W. 2008; SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport. Geological Survey (US).

Miccolia et al., L. (2015). UHPC-AAC/CLC-Verbundfassadenelemente mit modifiziertem Innenputz für Neubau und Sanierung: Materialien und Fertigungstechnik. Journal of Facade Design and Engineering, 3, 91-102.

Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Struktur und Eigenschaften von Porenbeton: ein Überblick. Cement & Concrete Composites, 22, 321±329.

Ochs, F. (2013), Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher, FFG store4grid.

ÖNORM EN ISO 7345 (2018), Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen -

Physikalische Größen und Definitionen, Wien. Austrian Standards Institute.

ÖNORM EN ISO 8990 (1996), Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand - Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten, Wien. Austrian Standards Institute.

ÖNORM EN 12524 (2000), Baustoffe und -produkte Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften: Tabellierte Bemessungswerte, Wien. Austrian Standards Institute.

ÖNORM EN ISO 17892 (2015), Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben: Teil1: Bestimmung des Wassergehaltes, Wien. Austrian Standards Institute.

ÖWAV-Regelblatt 207 (2009), Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen, Wien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.

Sarbu, I. und Sebarchievici, C. (2018), „A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage“ , Sustainability, 10. Jg., Nr. 1, S. 191.

Schleicher, J. (2022), Auswirkungen eines thermisch verbesserten Konstruktionsbetons auf Underground Thermal Energy Storage (UTES) Systeme, Masterarbeit, Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, Technische Universität Graz.

Schout, G., Drijver, B., Schotting, R. 2016; The influence of the injection temperature on the recovery efficiency of high temperature aquifer thermal energy storage: Comment on Jeon et al., 2015. Energy 103, 107–109.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N.M., Kinzelbach, W. 2019; Thermal use of shallow groundwater. CRC Press.

Thorne, D., Langevin, C.D., Sukop, M.C. 2006; Addition of simultaneous heat and solute transport and variable fluid viscosity to SEAWAT. Computers & geosciences 32, 1758–1768.

Triantafyllidis, T. (2004), Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau: Teil 1: Schlitzwand- und Dichtwandtechnik, Ernst & Sohn, Berlin.

Wasserrechtsgesetz 1959, BGBl Nr. 215/1959, i. d. F. vom 03 11 2020, Bundeskanzleramt, Rechtsinformationssystem (RIS), URL: <http://www.ris.bka.gv.at>.

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
A	Oberfläche
ATES	Aquifer-Wärmespeicher
BTES	Erdsonden-Wärmespeicher
c	Wärmespeicherkapazität
c_s	Wärmespeicherkapazität des Untergrundes
d	Durchmesser eines Wärmespeichers
DW ² / DW2	Akronym des Projektes
EB-WSp	Erdbecken-Wärmespeicher
e_{init}	Initielle Porenzahl
h	Höhe eines Wärmespeichers
HW-WSp	Behälter-Wärmespeicher
LC	Leichtbeton
LCA	Life-Cycle-Assessment
NC	Normalbeton
Pe	Peclet-Zahl
V	Volumen
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_s	Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)